

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА  
на тему**

“ Система енергоефективного управління виробництвом керамічної цегли”

Дипломник

Єврах О. О.

Група

Су.мдн-11ш

Керівник диплому  
к.т.н. зав. каф.

Худолей Г.М.

Суми  
2022

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Кафедра комп'ютеризованих систем управління

ЗАТВЕРДЖУЮ:  
Зав. кафедри КСУ

\_\_\_\_\_ П.В. Леонтєв  
\_\_\_\_\_ 2022 р.

**ЗАВДАННЯ**

на кваліфікаційну роботу магістра студенту

Єврах Олександр Олександрович

(Прізвище, ім'я, по-батькові повністю)

1. Тема кваліфікаційної роботи Система енергоефективного управління виробництвом керамічної цегли

затверджена наказом ректора СумДУ № 1079-IV від " 14 " листопада 2022 р.

2. Термін здачі студентом закінченої роботи " 12 " грудня 2022 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:

1. Звіт з переддипломної практики; \_\_\_\_\_

2. Виробництво будівельної кераміки [Електронний ресурс] // Всеукраїнська спілка виробників будматеріалів. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <http://avbmv.com.ua/>

3. Ликов А.В. Теорія сушіння /О.В. Ликов. – М.: Енергія, 1968. - 472с.

4. Автоматизація технічних процесів: ДСТУ 21.404 – 85;

4. Зміст кваліфікаційної роботи (питання, що підлягають розробленню):

1. Конструктивно-технологічний аналіз виробництва цегли

2. Інформаційний аналіз процесу та вибір каналів управління

3. Вибір сучасних засобів автоматизації

4. Розробка математичної моделі та синтез системи управління технологічним процесом сушіння цегли-сирця в камері періодичної дії

5. Перелік графічних матеріалів:

1. Функціональна схема автоматизації

2. Схема електрична принципова

3. Презентація до доповіді

6. Календарний план виконання роботи

Номер етапу	Зміст етапу виконання роботи	Термін виконання
1	Аналіз завдання кафедри	жовтень
2	Конструктивно-технологічний аналіз виробництва цегли	жовтень
3	Інформаційний аналіз процесу. Вибір каналів управління, розробка функціональної схеми автоматизації	жовтень - листопад
4	Вибір технічних засобів автоматизації та розроблення алгоритму управління	листопад
5	Виконання персонального завдання наукового керівника щодо розрахунково-дослідної частини роботи	листопад - грудень
6	Оформлення роботи	грудень

7. Дата видачі завдання " 26 " вересня 2022 р.

Керівник проекту:

Завідувач кафедри СІТ ШІ СумДУ, к.т.н. \_\_\_\_\_  
(науковий ступінь, вчене звання, посада) (підпис)

Худолей Г.М. \_\_\_\_\_  
(прізвище, ініціали)

До виконання прийняв:  
студент гр. СУ.мдн-11ш \_\_\_\_\_  
(шифр групи) (підпис)

Єврах О.О. \_\_\_\_\_  
(прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Єврах Олександр Олександрович. Система енергоефективного управління виробництвом керамічної цегли. Кваліфікаційна робота зі спеціальності 151- Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології. Сумський державний університет. Суми, 2022 рік.

Пояснювальна записка складається зі вступу, 4 розділів, висновку, 2 додатків, включає 103 сторінки, 20 таблиць, 52 рисунки, 28 використаних джерел та конструкторську документацію, яка містить 2 креслення.

Метою роботи є підбір більш сучасних приладів, стабілізувати параметри процесу сушки і знизити споживання енергоресурсів. В першому розділі було виконано аналіз структури об'єкта управління та описано технологічний процес разом з процесом сушіння. Другий розділ присвячений аналізу об'єкта управління. Також виконується вибір каналів управління. Третій розділ описує сучасні засоби автоматизації та вибір їх для цієї роботи за певними параметрами. Також була виконана розробка системи управління, який має чотири алгоритми роботи (1 - підготовка до роботи; 2 - завантаження; 3 - сушка; 4 – розвантаження). У четвертому розділі було обґрунтовано вибору для досліджень стадії сушіння, проаналізовано об'єкт управління та процес сушки, розроблено математичну модель аналітичним методом та синтез системи управління процесу сушіння. Розроблено алгоритм роботи.

*Ключові слова:* ПРОДУКТИВНІСТЬ, СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ, СУШКА, КОНТРОЛЬ, РЕГУЛЮВАННЯ, ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ, АВТОМАТИЗАЦІЯ.

## SUMMARY

Yevrakh Oleksandr Oleksandrovykh. System of energy-efficient control of ceramic brick production. Qualification work on specialty 151- Automation and computer-integrated technologies. Sumy State University. Sumy, 2022.

The explanatory note consists of an introduction, 4 chapters, a conclusion, 2 appendices, includes 103 pages, 20 tables, 52 figures, 28 used sources and design documentation, which contains 2 drawings.

The purpose of the work is to select more modern devices, stabilize the parameters of the drying process and reduce the consumption of energy resources. In the first section, the analysis of the structure of the control object was performed and the technological process together with the drying process was described. The second section is devoted to the analysis of the management object. Control channels are also selected. The third section describes modern automation tools and their selection for this work according to certain parameters. A management system was also developed, which has four work algorithms (1 - preparation for work; 2 - loading; 3 - drying; 4 - unloading). In the fourth chapter, the selection for research of the drying stage was justified, the control object and the drying process were analyzed, a mathematical model was developed using the analytical method and the synthesis of the drying process control system was developed. A work algorithm has been developed.

*Keywords:* PRODUCTIVITY, A CONTROL SYSTEM, DRYING, CONTROL, REGULATION, THE POWER SAVINGS, AUTOMATION.

## ЗМІСТ

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ .....	6
ВСТУП .....	7
1 КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА УПРАВЛІННЯ.....	9
1.1 Аналіз структури об'єкта управління.....	9
1.2 Технологічний аналіз процесу сушіння .....	13
2 ІНФОРМАЦІЙНИЙ АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА УПРАВЛІННЯ. ВИБІР КАНАЛІВ УПРАВЛІННЯ .....	15
2.1 Інформаційний аналіз об'єкта управління.....	15
2.2 Вибір каналів контролю і управління.....	16
2.3 Вимоги до системи управління .....	17
2.4 Локальні контури управління за обраними параметрами .....	18
2.4.1 Локальний контур вимірювання параметрів повітря, що подається в сушильну камеру і управління заслінками подачі гарячого і нагрітого повітря в камери №1, №2, №3 .....	18
2.4.2 Локальний контур управління двигуном електролафета .....	19
2.4.3 Локальний контур управління двигуном електротельфера .....	19
3 ВИБІР СУЧАСНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ. РОЗРОБКА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ .....	21
3.1 Вибір сучасних засобів автоматизації .....	21
3.1.1 Вибір засобів вимірювання вологості. ....	21
3.1.2 Вибір засобів вимірювання температури.....	25
3.1.3 Вибір засобів вимірювання витрати повітря .....	25
3.1.4 Вибір засобів вимірювання ваги .....	27
3.1.5 Вибір датчиків положення візка .....	29
3.1.6 Вибір датчиків положення двері.....	31
3.1.7 Вибір регулюючих органів.....	32
3.1.8 Вибір виконавчого механізму .....	33
3.1.9 Вибір пристроїв плавного пуску.....	35
3.1.10 Вибір частотного перетворювача .....	39
3.1.11 Вибір пристрою живлення.....	41
3.2 Вибір системи управління об'єктом автоматизації .....	42
3.3 Вибір мікроконтролера. ....	44
3.3 Компонування схеми автоматизації .....	47
3.4 Вхідні-вихідні сигнали для вибору периферійних пристроїв .....	48
3.5 Алгоритм роботи системи управління.....	50
4 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА .....	53
4.1 Обґрунтування вибору для досліджень стадії сушіння технологічного процесу виготовлення керамічної цегли .....	53
4.2 Конструктивно-технологічний аналіз об'єкта управління – камерної сушарки періодичної дії .....	54
4.3 Аналіз механізму процесу сушки матеріалів .....	58

4.4 Розроблення математичної моделі процесу сушіння матеріалу в камерній сушці періодичної дії аналітичним методом .....	61
4.4.1 Аналіз проблеми .....	61
4.4.2 Обґрунтування та прийняття припущень, що спрощують, та ідеалізація режимів. ....	63
4.4.3 Формування рівнянь математичної моделі. ....	64
4.4.3.1 Тепловий баланс об'єкта управління відносно теплоносія .....	64
4.4.3.2 Тепловий баланс об'єкта управління відносно матеріалу, що висушується .....	66
4.4.3.3 Матеріальний баланс об'єкта управління відносно вологи, що знаходиться в матеріалі .....	68
4.4.3.4 Матеріальний баланс об'єкта управління відносно вологи, що знаходиться в теплоносії .....	70
4.4.4 Складання математичної моделі об'єкта управління (камерної сушарки періодичної дії) та її аналіз.....	72
4.4.5 Розроблення математичної моделі, алгоритму та програми для визначення параметрів стану вологого повітря.....	73
4.4.6 Розробка та перевірка працездатності математичної моделі об'єкта управління.....	75
4.4.7 Аналіз статичних характеристик об'єкта управління та вибір каналів впливу .....	78
4.5 Синтез системи управління процесу сушіння матеріалу в камерній сушці періодичної дії....	81
4.5.1 Вибір функціональної структури системи управління .....	81
4.5.2 Математична модель об'єкта управління – камери змішування потоків .....	82
4.5.3 Математична модель сервопривода.....	83
4.5.4 Моделювання динамічних властивостей об'єкта управління – камери змішування, при сумісній роботі з сервоприводами.....	85
4.5.5 Синтез системи стабілізації температури на вході в сушарку .....	86
4.5.6 Дослідження роботи системи стабілізації температури на вході в сушарку при дії зовнішніх збурень.....	88
4.6 Розроблення алгоритму роботи системи управління процесом сушіння матеріалу в камерній сушці періодичної дії .....	90
ВИСНОВОК .....	92
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	94
ДОДАТОК А.....	96
ДОДАТОК Б .....	100

## СПИСОК СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

АСУ ТП - автоматизована система управління технологічним процесом.

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

БЖ – блок живлення

ВВ – ввід-вивід

ККД – коефіцієнт корисної дії

МК – мікроконтролер

СУ – система управління

ПК – пристрій керування

БНіП – будівельні норми і правила

ППП – пристрій плавного пуску

ПЛК - програмованого логічного контролера

АРМ – автоматизоване робоче місце



## ВСТУП

Історія цегли нараховує тисячі років, адже перші свідчення про використання цього матеріалу відносяться до 2-3 століття до нашої ери. Уже тоді робочі в Єгипті використовували глиняні бруски для зведення різних споруд. Проте, до XIX століття техніка виробництва цегли була примітивною - все робили вручну, а сушили цеглу і зовсім тільки влітку. За все своє довге життя технологія виготовлення керамічної цегли зазнала не так багато змін, але удосконалень пережила безліч. До початкового ручного формування і природній сушці цегли додався випал. Лише до кінця 19-го століття процес виробництва цегли вдалося багато в чому автоматизувати і зробити цілорічним. Сьогоднішні заводи з виробництва цегли - це складні автоматизовані системи, що працюють цілий рік. Але і на сьогоднішній день до повної автоматизації виробництва далеко[19]. Так чи інакше, цегла глиняна пластичного пресування була і залишається найпоширенішим стіновим керамічним матеріалом. Економічна ж цінність цього виробництва для крани полягає в тому, що будівництво в Україні та інших країнах дуже важлива справа і потрібні матеріали які б відповідали відповідним критеріям. Особливо в ситуації, яка зараз відбувається це є дуже актуальним.

Зростання продуктивності роботи та якості продукції відбувається за рахунок найсучасніших приладів, які були ідеально підібрані по економічності та параметрам для їх роботи. Економія матеріальних, трудових та енергетичних ресурсів буде реалізована за допомогою спеціальних методів. Наприклад, один з таких методів є розташування приміщення до місця з необхідними ресурсами таких як глина, на відстані не більше ніж 2 км. У такому випадку витрати палива та часу на доставку сировини будуть оптимальними. Якщо сировина перебуває на відстані більше 20 км від приміщення, виробництво стає нерентабельним. Також економія буде зростати із-за приладів автоматизовано налаштованих на певний алгоритм роботи про який йдеться в перших розділах роботи.

Підприємства з виготовлення цегли в світі середньої потужності дають 5-15 млн цеглин щорічно, термін їх окупності становить 2-3 роки, а великі потужні заводи з продуктивністю 25-60 млн повертають власнику інвестовані кошти за період від 1,5 до 2 років. Однак вищенаведені цифри стосуються тільки тих підприємств, які були раніше в експлуатації. Спорудження нового вимагає вже не кількох мільйонів, а кількох десятків мільйонів гривень, і окупиться воно не так швидко. Тому розвивати підприємство з нуля варто лише в тому випадку, якщо воно розраховане на значно більші потужності, ніж наведені вище приклади, і планує виготовляти лише високоякісну цеглу. Процес виготовлення цегли досить складний і багатоетапний, тому заслуговує на особливу увагу з

боку підприємця. Складність процесу прямо пропорційна рівню потужності заводу. Адаже підприємства середньої та великої потужності значною мірою автоматизовані: тільки в такому випадку вони можуть виготовляти велику кількість цегли. Маленькі заводи виробляють від 2 до 3 млн цеглин щорічно і окупаються в термін від 2,5 до 4 років. Підприємства середньої потужності дають 5-15 млн цеглин щорічно, термін їх окупності становить 2-3 роки, а великі потужні заводи з продуктивністю 25-60 млн повертають власнику інвестовані кошти за період від 1,5 до 2 років. Якщо ми говоримо про завод середньої та великої потужності, то в сучасних заводах цей процес теж повністю автоматизований, з початку виробництва до отримання першої повноцінної цегли проходить від 6 днів (завод середньої потужності) до 3 тижнів (невелике виробництво). Швидкість виготовлення продукції залежить від двох факторів: використовуваних технологій та погодних умов. Продуктивність заводу також залежить від того, яку піч ви оберете. Вони бувають переважно двох видів: кільцеві та тунельні. Використання першої вимагає менших витрат, але в такому разі не обійтися без ручної праці. При цьому якість цегли, випаленої в кільцевій печі, буде нижчою, ніж в більш дорогій і повністю автоматизованій тунельній печі.[20]

Призначення існуючої СУ технологічного процесу в цілому є покращення якості регулювання основних технологічних параметрів, зменшення відхилень від норм технологічного регламенту, заміна морально чи фізично застарілих існуючих засобів автоматизації та покращення роботи алгоритму для сушки цегли.

Завданням цієї роботи є розробка системи, яка б зменшила витрати енергії та покращила б якість матеріалу, що виробляється. В даному випадку – це покращення та вдосконалення процесу сушки цегли за допомогою оптимальної роботи сушарки. Робота виконується на основі завдання кафедри системотехніки та інформаційних технологій Шосткинського інституту СумДУ.

Основний зміст дипломної роботи подано в чотирьох розділах, де представлені: «конструктивно-технологічний аналіз об'єкта управління», «інформаційний аналіз об'єкта управління, вибір каналів управління», «вибір сучасних засобів автоматизації, розробка системи управління» та «розрахункова частина».

# 1 КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА УПРАВЛІННЯ

## 1.1 Аналіз структури об'єкта управління

В основі процесу пластичного утворення в системах, що складаються з високодисперсних мінеральних частинок і пластифікуючих рідин (або суспензій, емульсій, гелів), лежить цілий комплекс досить складних фізико-хімічних явищ. Незважаючи на численні проведені дослідження, теоретичні основи цих процесів, а також методи оцінки їх формоутворювальних властивостей ще недостатньо розроблені.

Ступінь випалу впливає на водостійкість і морозостійкість цегли. Необпалена цегла (темніша за звичайну обпалену цеглу, глуха при ударі та важка) є слабкою та нестійкою. Його використання обмежується кладкою внутрішніх стін з невеликими навантаженнями. Обпалена цегла міцніша, погано вбирає вологу, щільніша і краще проводить тепло. При ударі він видає високий тон звуку і часто має неправильну форму. Його призначення – кладка у вологих місцях.

На рис. 1 представлена технічна схема виробництва керамічної цегли. Глина з кар'єру транспортується самоскидом в глинозапасник (1). У глинозапаснику глина мостовим грейферним краном (2) подається до агрегату завантаження сировини (3). Завантажувальна установка призначена для приймання глиняної сировини, її первинного подрібнення, обліку та дозування для подальшої переробки. Завантажувальний блок містить раму з прикріпленим бункером. Внизу всередині бункера встановлені чотири шнеки, які можуть обертатися (один проти одного - попарно) з лопатями, розташованими вздовж шнека. Обертання шнека здійснюється від встановленого на раму приводу через роздавальну коробку.

Агрегат працює так: великі грудки глини в бункері подрібнюються та розпушуються лопатями на обертовому валу агрегату. Після подрібнення глина гвинтовим розташуванням валів лопатей переміщується до вивантажувального люка, через який надходить на вихідний стрічковий конвеєр завантажувального агрегату, а потім у приймальний шнекового транспортера (4). Система частотного регулювання приводу дозволяє варіювати продуктивність агрегату, підтримуючи достатній запас глини для забезпечення роботи агрегату підготовки сировини (5).

Подальша обробка глини відбувається в цеху підготовки сировини. Блок підготовки сировини містить раму, на якій встановлено завантажувальний короб (піч) (5.1), барабан (5.2), привід обертання барабана, піч (5.3) і розвантажувальний бункер глинистої сировини (5.4).

Шнековий транспортер (4) забезпечує потужну і рівномірну подачу глини з ящика в барабан. Камера згоряння, оснащена газовими пальниками (природний газ), забезпечує теплову енергію для процесу сушіння. Барабан локалізує в своєму обов'язі термічний процес, який висушує глину до технічно необхідної вологості і здійснює її подрібнення. Він влаштований наступним чином: на рамі змонтований привід обертання барабана (електродвигун, редуктор, вал приводний, ланцюгова

передача, ролик опори приводу прогумований). Барабан встановлений на прогумованих роликах поворотного приводу, а рама виконана таким чином, щоб вісь барабана розташовувалася під нахилом  $4^\circ$  до горизонталі .

Осьовий рух барабана обмежений постійними роликами. Корпус барабана виготовлений з прямошовної сталеві труби, до «гарячого» кінця якої закріплена циліндрична сітка. Зовнішня поверхня корпусу укріплена стрингерами, розташованими вздовж його пласта, з ізоляцією, прокладеною між стрингерами і покритою зовні сталевими пластинами. На зовнішній поверхні корпусу барабана встановлено два опорних кільця, а барабан спирається на приводні ролики, утворюючи пару тертя.

На «холодному» кінці внутрішньої поверхні барабана на певній відстані кріпляться ланцюгові завіси, ланцюги груп, що утворюють завісу, відрізняються довжиною і формою. Ланцюжок кріпиться до поверхні барабана одним кінцем або гірляндою. Між ланцюговою завісою і ґратами на внутрішній поверхні барабана вмонтовано кілька рядів лопаток (полічок), виконаних у вигляді рамок і заповнених полотном (типу кольчуги) з переплетених кілець. Нижня частина колосникового об'єму решітки засипається молотьовими кульками. Обидва кінці барабана з'єднані з завантажувальним ящиком і розвантажувальним бункером, завантажувальний ящик з'єднаний з «холодним» кінцем барабана, а решітка «гарячого» кінця барабана повністю розміщена в розвантажувальному бункері. Навпроти барабана збоку через протилежну стінку розвантажувального бункера в бункер вводиться сопло печі. З'єднання коробки з бункером і барабаном виконані у вигляді оригінальних ущільнень. Його конструкція виключає «підсмоктування» атмосферного повітря в барабан і термінову евакуацію пилу з барабана, радіальні і торцеві биття, що виникають при обертанні барабана.

Сушка і подрібнення глиняної сировини відбувається під час її руху всередині барабана. Рух глини всередині барабана спричинений дією сили, що виникає, коли барабан обертається навколо власної осі, розташованої під кутом  $4^\circ$  до горизонталі. Обертання барабана здійснюється за допомогою фрикційної передачі, утвореної опорними приводними роликами і бандажами, встановленими на барабані. Сушка глини здійснюється в барабані протитечею під дією 3-х факторів:

- контакт глиняної сировини з потоком гарячого газу, що йде з печі через барабан.
- сирий глиняний матеріал контактує з нагрітою внутрішньою поверхнею барабана, коли він рухається вздовж барабана.

- глиняна сировина контактує з ланцюговою завісою, прикріпленою до внутрішньої поверхні барабана, яка нагрівається потоком гарячого газу, що проходить через барабан , забезпечуючи рівномірний об'ємний нагрів глини. Температуру димових газів підтримують в межах  $400^\circ\text{C}$  для виключення зневоднення глини і руйнування її кристалічної решітки з втратою пластичності .

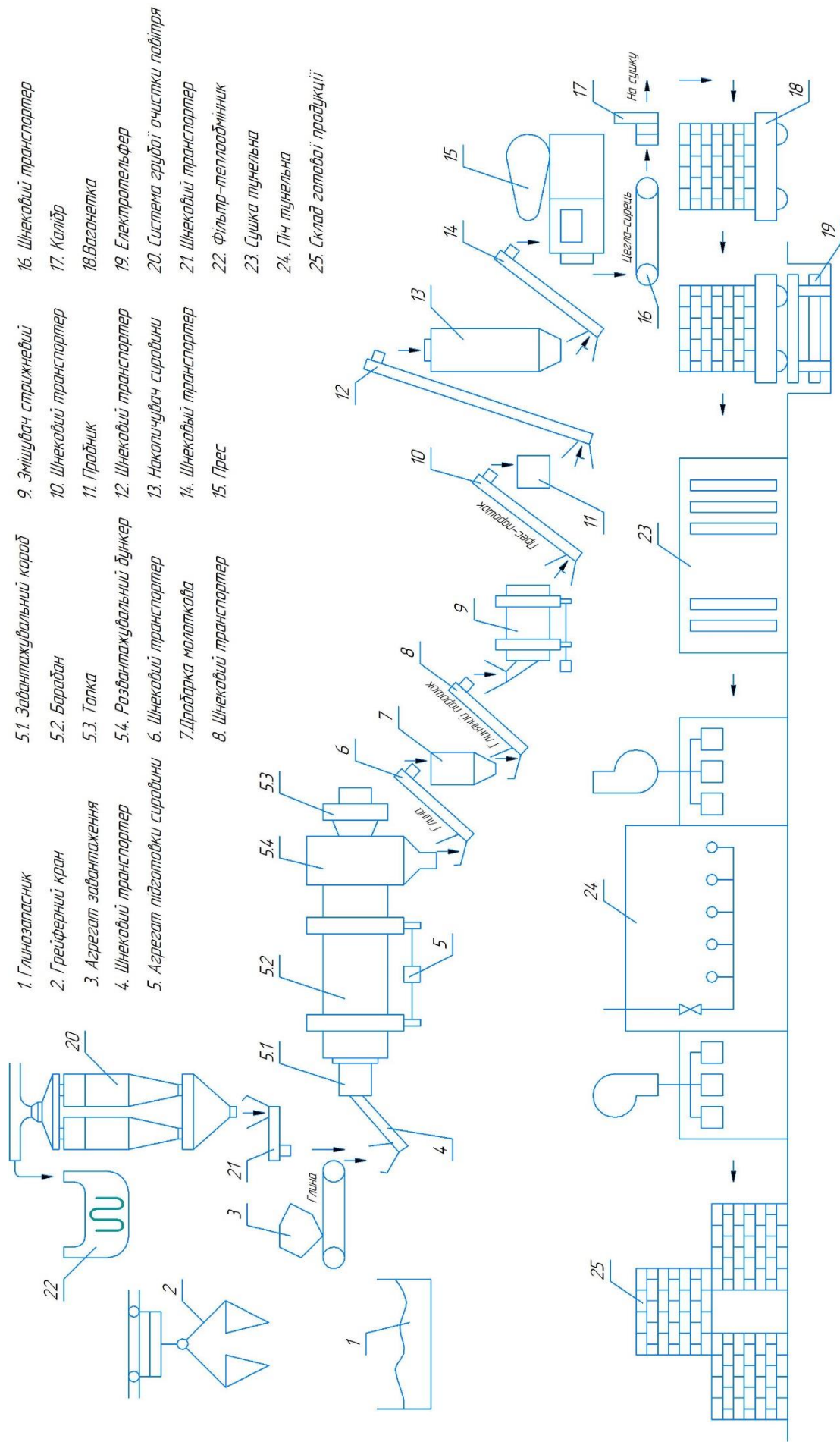


Рисунок 1 - Технологічна схема виробництва керамічної цегли

В барабані одночасно з сушінням здійснюється процес подрібнення глиняної сировини. Дроблення глини в барабані здійснюється в два етапи, в двох зонах - в зоні розташування ланцюгових завіс і в зоні колосникових грат. Дроблення глини на першому етапі відбувається під впливом чотирьох факторів. Перший — зіткнення грудок глини, другий — взаємне зношування грудок, що контактують один з одним, і третій — вплив ударів ланцюга на грудки глини, четвертий — одноразовий знос ланцюгів завіс. Друга стадія подрібнення відбувається в зоні розвантаження барабана, де помельні кулі вдаряються об глину.

Подрібнена і висушена глина до 30 мм стікає в колосникову щілину, через розвантажувальний бункер із завантажувальним клапаном і на вихідний шнековий транспортер (6). На виході з сушильного барабана встановлена магнітна пастка (не показана) для запобігання потраплянню сталі в технічний відсік.

Задіяні в процесі сушіння глини топкові гази, насичені водяною парою і пилоподібними частинками, видаляються з барабана і промиваються двоступеневою системою пиловидалення. На першому етапі очищення газу відбувається в серії циклонів, що утворюють систему грубого очищення повітря (20). Ступінь очистки повітря від пилу на 1-му ступені досягає 90%. Очищений на першому ступені відхідний газ надходить у фільтр-теплообмінник (22).

Ступінь очищення повітря другого ступеня становить 90% і більше. Очищений газ направляється в систему опалення з глинозапасником, а потім викидається в атмосферу, а конденсат, який має адсорбований глинистий пил, скидається в відстійник через шламопроводів. Пилоподібні частинки, що осідають з димових газів першого ступеня з бункера циклону, надходять у шнековий транспортер (21) і повертаються в потік технологічного матеріалу (всередину барабана).

Вилучену з барабана глину направляють на подальшу обробку в молоткову дробарку (7). Там глина подрібнюється. Частинки глини після подрібнення в дробарці мають розмір, що відповідає вимогам техпроцесу (нижче 3 мм). З дробарки подрібнена глина шнековим транспортером надходить у стрижневий змішувач (9). Суха глина, що надходить із дробарки в стрижневий змішувач, перемішується, усереднюється і гранулюється, а готовий прес порошок завантажується шнековими транспортерами (10) і (12) подаючись в накопичувачі сировини(13), які оснащені бункерами з пневматичними ударними гарматами (для руйнування склепу).

Пробник (11) встановлений між транспортерами в потоці прес-порошку використовується для періодичного механічного вимірювання вмісту вологи в прес-порошку. Якщо вологість пресованого порошку перевищує технічно допустимі межі, то система автоматизації лінії, яка впливає (керує) на відповідні елементи виконання, усуває виниклі невідповідності (повертає граничну вологість до зазначеної в технічних вимогах).

Пресований порошок самопливом надходить із бункера для зберігання сировини на шнековий транспортер (14), який надає його в бункер преса (15). В результаті гіперпресу

(400 кг/см<sup>2</sup>) цегла-сирець формується (пресується) в пресі з оптимальним поєднанням вологості, температури і тиску.

Після виходу з преса цегла-сирець транспортером (16) передається на калібр (17), де їх механічно обробляють для отримання заданих геометричних розмірів. На додаток до механічної обробки, вся цегла-сирець, яка йде через калібр і проходить 100% контроль, після чого результати визначають придатність сировини для подальшої технічної обробки, відбраковуючи сирець, що не має необхідних параметрів (негідний), і повертається до переробки.

## 1.2 Технологічний аналіз процесу сушіння

Для сушіння цегли передбачені тунельні сушарки (23) з поперечним ходом теплоносія. Сушила мають 13 камер і розділена на 2 частини: з 1 по 6 камери в першій частині, а в другій з 7 по 13 камеру. За схемою теплопостачання всі камери розбиті на три блоки. Блок сушки обслуговується групою, яка складається з теплогенератора ТВС-8, циркуляційного вентилятора МВТ-120-470-15Р, вентилятора витяжки ВР 80-75 №12,5 і повітропроводу, який розподілений і пов'язаний з клапанами для подачі теплоносія до кожної камери.

Кожна камера має двері, які піднімаються вгору за допомогою електротельфера. В середині камери встановлено 6 паралельних рейкових шляхів, уздовж яких змонтовані металеві 10-поличні стелажі для укладання на них пари рейок з цеглою. Верхню частину камери перекривають «тимчасовим» перекриттям з азбестоцементних листів. В результаті між склепінням і «тимчасовим» перекриттям утворюється порожнина для циркуляції теплоносія. Усередині бічних стінок встановлені напрямні пристрої, призначені для розподілу потоку теплоносія по всьому перерізу камери. На центральній стінці встановлений осьовий вентилятор МВТ-120-470-15Р для циркуляції повітря для більш рівномірного висихання цегли по всьому об'єму в камері.

У центрі кожної половини камери передбачений канал для виведення вологого відпрацьованого повітря в атмосферу.

Гаряче повітря надходить у камеру із зони охолодження печі та від теплогенератора ТВС-8, що працює на природному газі. Теплогенератор забирає повітря з приміщення цеху через теплообмінник, нагріває його до 120°C і повертає нагріте повітря в сушильну камеру. З сушильної камери повітря видаляється за допомогою витяжного вентилятора ВР 80-75 №12,5.

Після сушіння цеглу знімають із сушильних рейок або сушильних лотків і поміщають у візок печі. Вогнетривка цегла викладається з внутрішньої сторони печі, в якій обпалюється цегла. Цегляна піч (24) складається з трьох основних зон: зони підготовки, зони випалу та зони охолодження. Основна частина технологічного обладнання цегельного заводу зосереджена в зоні

випалу печі. Для розпалювання цегли використовуються пальники, розташовані над піччю або збоку від неї.

Після випалу цегли в печі візок печі транспортується до станції пакування цегли. Автоматичні гідравлічні грейфери німецької компанії Probst дозволяють плавно та надійно знімати випалену цеглу з печі та укладати пачки на транспортувальні піддони. Пресування мішків з цеглою здійснюється в автоматичному режимі. Пачки цегли на піддонах або без них подаються на станцію намотування. Упаковка для піддонів з керамічною цеглою буває двох видів: обгортання стретч-плівкою та упаковка з металевої або поліуретанової стрічки. Після чого цеглу збирають в складі готової продукції (25).

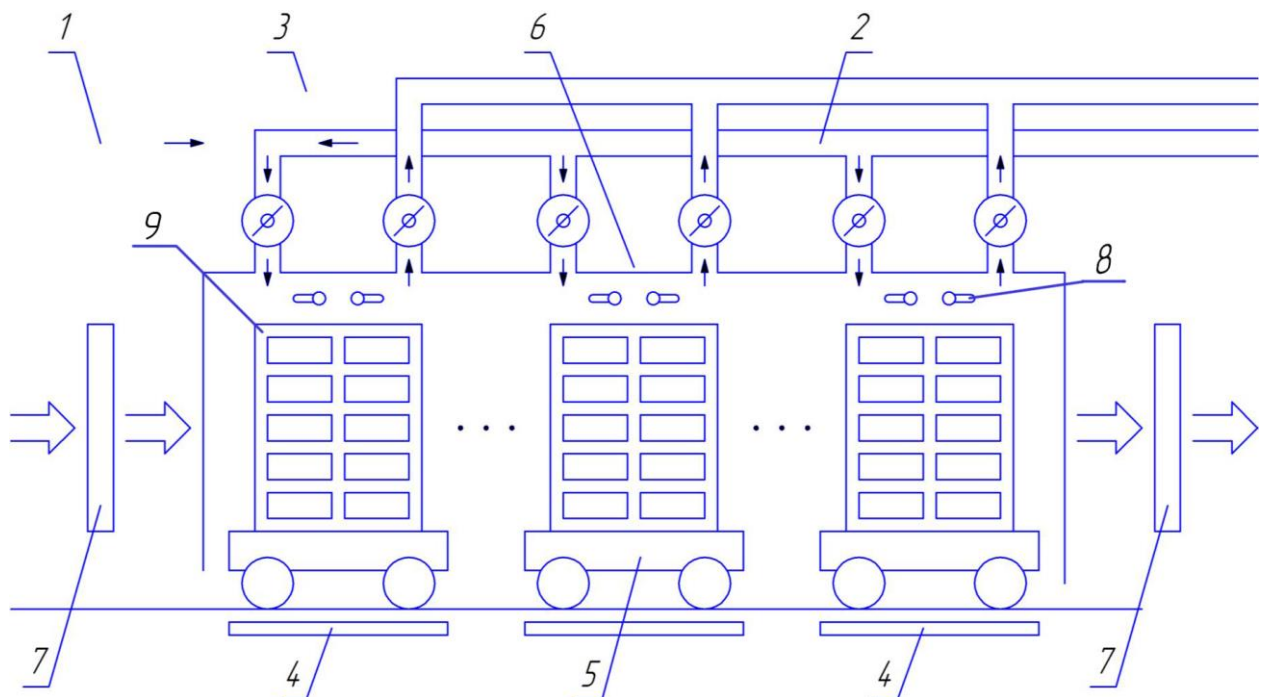


## 2 ІНФОРМАЦІЙНИЙ АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА УПРАВЛІННЯ. ВИБІР КАНАЛІВ УПРАВЛІННЯ

### 2.1 Інформаційний аналіз об'єкта управління

Такі термічні процеси, як сушка та випал, надзвичайно важливі для стабільного виробництва високоякісної будівельної цегли. При реструктуризації діючого цегельного заводу для проектування нового цегельного заводу ключовим завданням є забезпечення високої продуктивності теплової установки, високої якості готової продукції та низьких енерговитрат [26].

Одним із найбільш енерговитратних процесів у виробництві керамічних виробів є процес сушіння. Технічна схема процесу сушіння представлена на рис. 2.1.



1 - повітропровід гарячого повітря; 2 - повітропровід нагрітого повітря; 3 - заслінка регулювання витрат гарячого повітря; 4 - заслінка регулювання витрат нагрітого повітря; 5 - датчик температури повітря; 6 - датчик вологості повітря; 7 - датчик вологості сировини; 8 - датчик ваги; 9 - вагонетки з сировиною.

Рис. 2.1 - Технологічна схема процесу сушіння

Заслінка подачі гарячого повітря 3 та гарячого повітря 4 обладнані виконавчими механізмами. Гаряче повітря подається до сушарки, а нагріте повітря видаляється з сушарки, щоб можна було виправити втрату вологи в різних частинах сушарки.

Перед завантаженням сировини в сушарку в обладнанні 7 вимірюють її вологість. У процесі сушіння ваговими датчиками 8 вимірюють вагу візка 9 на початку, в середині та в кінці сушарки. Розраховується вологість цегли. Також вимірюється температура, вологість і потік повітря.

В даний час існують добре розроблені методи математичного опису процесів теплообміну та масообміну, на основі яких створюються дуже зручні математичні моделі об'єктів. Однак методи керування процесом сушіння в основному зводяться до стабілізації режимних параметрів окремих контурів [25]. Це значно спрощує процес управління, але часто на шкоду його якості.

Характерним недоліком існуючих автоматизованих систем є неможливість без участі оператора ефективно регулювати параметри повітря, що подається в сушарку в процесі сушіння сировини. Це призводить до утворення дефектів (тріщин, відшарувань, порожнин).

Усунення зазначеного недоліку дозволить стабілізувати якість продукції, що випускається і підвищити продуктивність роботи технологічного обладнання.

## 2.2 Вибір каналів контролю і управління

Параметрична схема процесу сушіння приведена на рис. 2.2.

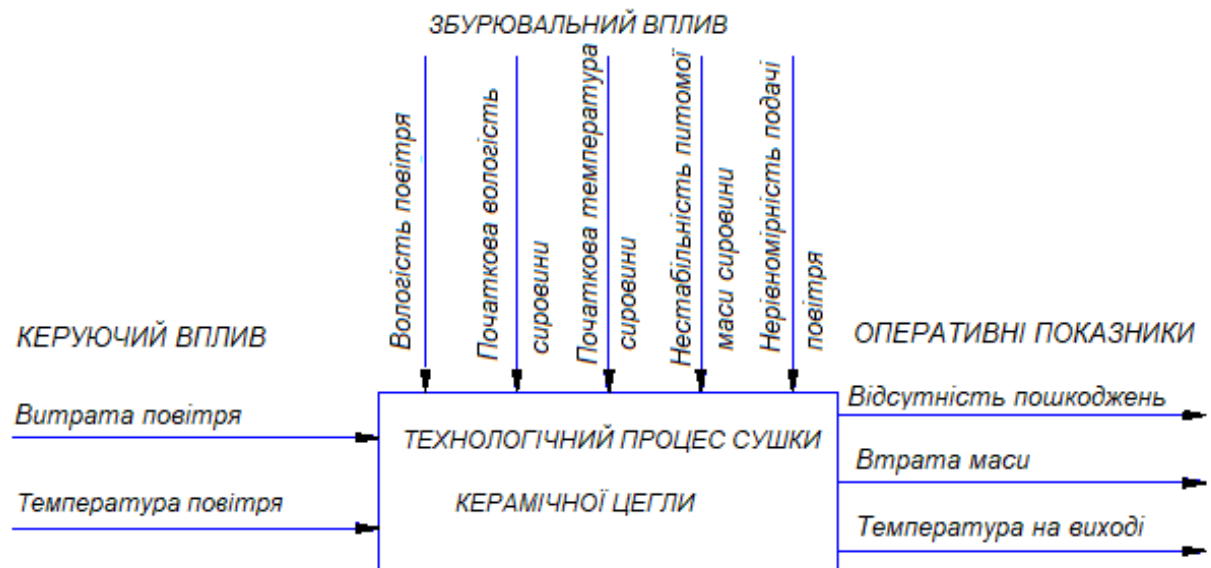


Рис. 2.2 - Параметрична схема процесу сушіння

Для керування процесом сушіння запропоновано використовувати математичну модель втрати маси сировини на основі вимірних змін маси.

У режимі постійної продуктивності рекомендується змінювати параметри теплоносія для контролю процесу сушіння. Останнє регулюється, але шляхом контролю зважування вагонетки із сировиною, щоб наприкінці технологічного процесу була досягнута необхідна вологість без дефектів (тріщин, розшарування, втрати міцності).

В цілому регулювання процесу сушіння зводиться до підтримки в діапазоні заданих значень вологості, температури і витрати повітря, що подається в тунельну сушарку. Більше детально розглянуто це питання в Розрахунковій частині (п. 4.4.7).

### 2.3 Вимоги до системи управління

Основним завданням системи управління є підтримання ефективності процесу сушіння. Це позитивно позначається на витраті теплоносія, необхідному для забезпечення заданої вологості цегли, і екологічності процесу сушіння. .

Традиційно задача оптимізації керування процесом сушіння будівельних матеріалів вирішується шляхом пошуку керуючих впливів за допомогою багатофакторних моделей, що зв'язують параметри сировини та показники якості готової продукції, такої як цегла. При цьому підвищення точності оптимального керування зводиться до завдання підвищення точності визначення коефіцієнтів моделі. Це можна гарантувати за допомогою адаптивного керування [27].

Аналіз сучасних технологічних процесів сушіння і випалу керамічної цегли дозволив виявити цілий ряд факторів [24], який дає віднести цю технологію до класу слабоформалізованих процесів:

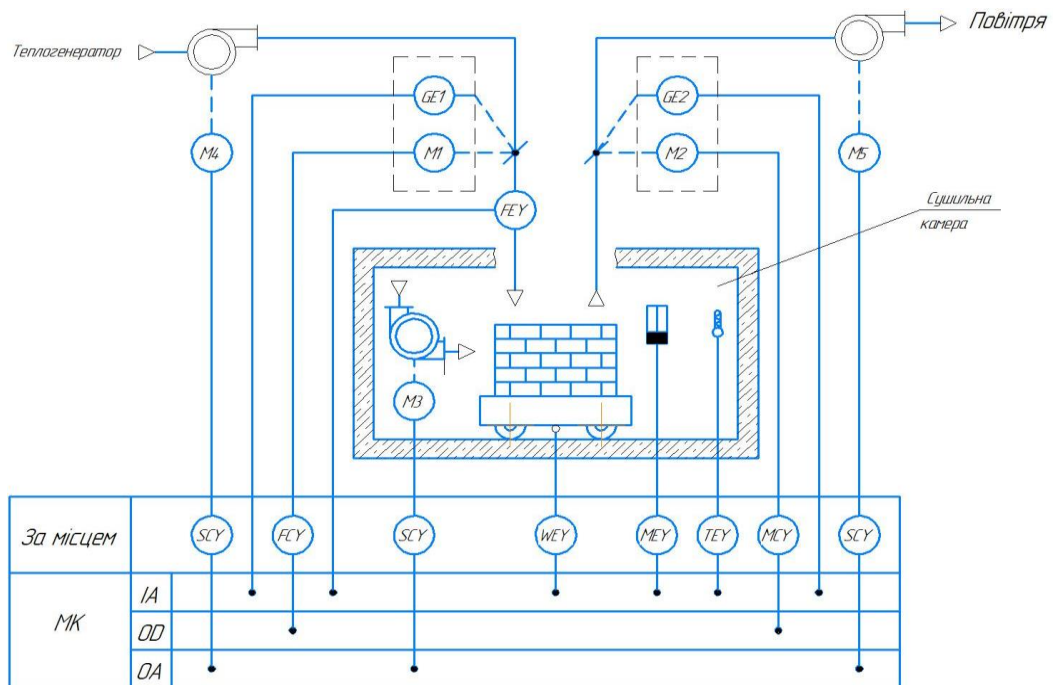
- параметри, які, як правило, можуть бути візуально та якісно оцінені оператором (нестабільність певної маси сировини, нерівномірність подавання повітря, футерівка вагонетки печі);
- неможливість дійового контролю властивостей керамічної цегли в процесі сушіння;
- значний час сушіння та теплова інерційність сушильної установки;
- можливе порушення технічного регламенту, що може призвести до значних матеріальних втрат;
- наявність людини як ланки технологічного ланцюга при штовханні печі вагона

У зв'язку з існуванням різних сценаріїв перебігу технологічного процесу, що визначаються вищевказаними факторами, доцільно використовувати загальну модель, яка адекватно описує об'єкти керування, придатна для цифрових систем керування та прийнятна за складністю. Велика кількість заданих сценаріїв керування, необхідність використання евристичних методів розпізнавання ситуацій у вигляді певного набору правил та експертиза зумовили використання процедур м'якого обчислення [28], у тому числі апарату нечіткої логіки. .

## 2.4 Локальні контури управління за обраними параметрами

2.4.1 Локальний контур вимірювання параметрів повітря, що подається в сушильну камеру і управління заслінками подачі гарячого і нагрітого повітря в камери №1, №2, №3

Відповідно до параметрами формулювання процесу сушки, представленими на рис. 2.2, управління процесом сушіння структуровано як завдання стабілізації вологості, температури та витрачання повітря. Груба робота над параметрами сушіння здійснюється шляхом контролю швидкості обертання подаючого і всмоктуючого вентиляторів, а точне регулювання параметрів сушки досягається зміною положення заслінок, прикріплених до повітропроводів.



MEY - датчик вологості повітря, FEY - датчик витрати повітря, TEY - датчик температури повітря, GE1(GE2) - датчик положення заслінки гарячого (нагрітого) повітря, SCY - частотний перетворювач, FCY, MCY - пристрій плавного пуску, M1 (M2) - електродвигун приводу заслінки гарячого (нагрітого) повітря, M3 - електродвигун циркуляційного вентилятора, M4 - електродвигун вентилятора теплогенератора, M5 - електродвигун витяжного вентилятора, IA- вхід мікроконтролера аналоговий, МК - мікроконтролер, OD - вихід мікроконтролера цифровий, OA- вихід мікроконтролера аналоговий

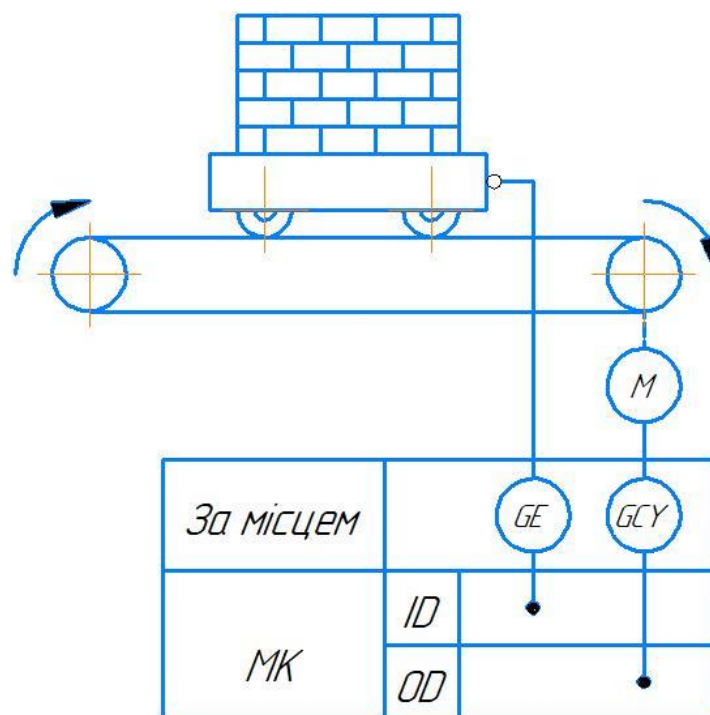
Рис. 2.3 - Контур стабілізації вологості, температури і витрати повітря

Крім того, контролюючи швидкість обертання вентилятора циркуляції повітря кожного сушильного блоку, можна оптимізувати процес сушіння на основі результатів вимірювання втрати ваги цегли-сирцю з часом.

Контур стабілізації цих параметрів для одного з блоків сушильної камери має форму, наведену на рис.2.3.

#### 2.4.2 Локальний контур управління двигуном електролафета

Переміщення каретки в сушильному каналі в положення зупинки активує фотодатчик, який працює за принципом прийому відбитих променів. У цьому випадку мікроконтролер повинен подати команду пристрою плавного пуску зупинити двигун електролафета.

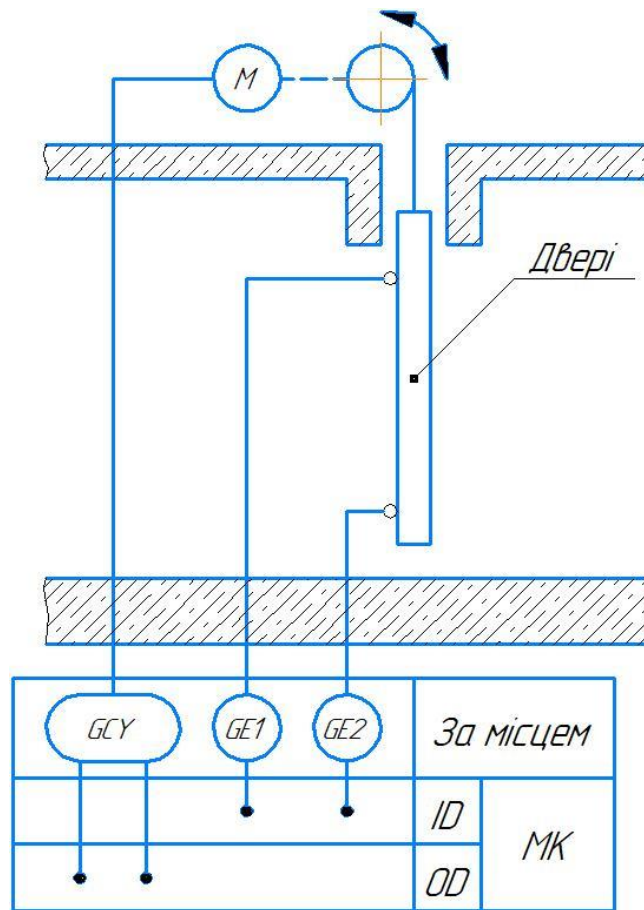


GE - фотодатчик положення візка, МК - мікроконтролер, ID- вхід мікроконтролера цифровий, GCU - пристрій плавного пуску, М-двигун електролафета, МК - мікроконтролер, ID- вхід мікроконтролера цифровий, OD - вихід мікроконтролера цифровий

Рис. 2.4 - Контур управління двигуном електролафета

#### 2.4.3 Локальний контур управління двигуном електротельфера

Блоки сушильних камер розділені дверцятами. Двері відкриваються і закриваються за допомогою електротельфера. Стан дверей (відкриті, закриті) визначається за допомогою індуктивних датчиків положення краю GE1, GE2. Привід електротельфера керується реверсивним пристроєм плавного пуску NSY.



GE1, GE2 - індукційні датчики положення дверей, GCY - пристрій плавного пуску реверсивний, М-двигун електротельфера, МК - мікроконтролер, ID- вхід мікроконтролера цифровий, OD - вихід мікроконтролера цифровий

Рис. 2.5 - Контур управління двигуном електротельфера

На основі локальних контурів була побудована функціональна схема автоматизації процесу сушіння цегли-сирцю.

## 3 ВИБІР СУЧАСНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ. РОЗРОБКА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ

### 3.1 Вибір сучасних засобів автоматизації

#### 3.1.1 Вибір засобів вимірювання вологості.

Перед завантаженням цегли-сирцю в камеру сушки і після вивантаження з неї в систему управління необхідно ввести значення його початкової вологості. На ринку пропонується кілька варіантів необхідних засобів вимірювання. Розглянемо наявні пропозиції.

#### *Електронний вологомір Wintact WT630*

Пристрій, що широко застосовується в будівництві, дає змогу виміряти вологість цегляного муру, картону, деревини різних порід. Належить до безконтактних експресвимірників вологості. Його перевага — здатність аналізувати матеріал, не руйнуючи його. В основу роботи приладу покладено принцип проникнення електромагнітних сигналів у поверхню, яка аналізується. Цим експрес-вимірювач WINTACT WT630 вигідно відрізняється від будь-якого голчастого вимірювача, позаяк руйнівальний метод вимірювання використовувати не завжди зручно. Безконтактний експрес-вимірювач WT630 легкий, компактний і простий у використанні.

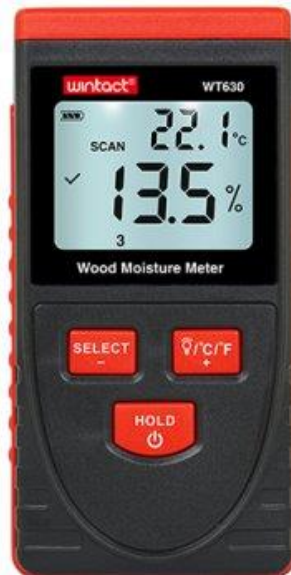


Рис. 3.1 - Електронний вологомір Wintact WT630

### Вимірювач вологи бетону вологомір-МГ4БМ

Прилад Вологомір-МГ4БМ призначений для оперативного контролю вологості деревини і широкої номенклатури будівельних матеріалів, у тому числі у виробках, конструкціях та спорудах за щільністю 400, 600, 800, 100, легкий щільністю 1000, 1200, 1400, 1600 і 1800, цегла керамічна і силікатна, забезпечена 15 градувальними залежностями на деревину.

Вологомір-МГ4БМ, на відміну від аналогів, має моноблочну конструкцію, що поєднує електронний блок та датчик. Вимірювання твердих матеріалів починаються автоматично під час встановлення приладу на об'єкт контролю.

Прилад забезпечує можливість контролю твердих матеріалів (бетон, розчинна стяжка, штукатурка, цегла) та деревини в лабораторних, виробничих та натурних умовах.

Принцип дії приладу заснований на кореляційній залежності діелектричної проникності матеріалу від вмісту вологи при позитивних температурах. Існує три режими виміру: одиничний; режим із усередненням вимірювань та режим безперервного вимірювання для виявлення ділянок з підвищеного вмісту вологи.



Рис. 3.2 - Вимірювач вологи бетону вологомір-МГ4БМ

Таблиця 3.1 - Порівняльні технічні характеристики вологомірів

Параметр	МГ4БМ	Wintact WT630
Діапазон вимірювання вологості будівельних матеріалів, %	1 - 45	0,5 - 79,5
Основна абсолютна похибка - не більше, %	± 1,5	± 1,5
Енергоживлення	акумулятор	Елемент живлення
Інтерфейс зв'язку з ПК	RS-485	немає
Маса, кг	0,8	0,146



З огляду на наявність зв'язку з ПК можна було б вибрати МГ4БМ. Але якщо дивитися на діапазон вимірювання, вагу та найголовнішу ціну, яка в МГ4БМ майже в 10 разів дорожче за Wintact WT630 і те що МГ4БМ важко де знайти, а Wintact WT630 широко розповсюджений прилад, то однозначно вибираємо Wintact WT630. Щоб можна було усунути основний недолік Wintact WT630, можна докупити програмне забезпечення для зв'язку з ПК, що в сумі вийде в рази менше ніж вартість МГ4БМ.

Під час сушіння цегли-сирцю необхідно вимірювати вологість поступаючого в камеру повітря. Розглянемо наявні пропозиції.

*Датчик (перетворювач) вологості та температури повітря ПВТ10*

Датчик вологості та температури ОВЕН ПВТ10 призначений для безперервного перетворення відносної вологості та температури неагресивного газу в два уніфіковані вихідні сигнали 4...20 мА та передавання вимірних значень за інтерфейсом RS-485 (Modbus RTU).

Функціональні особливості:

- цифровий датчик вологості та температури
- діапазон вимірювання відносної вологості: 0...95 %RH, абсолютна похибка 3,0 (4,0) %RH
- діапазон вимірювання температури: -20...+70 °С, абсолютна похибка 0,5 °С.
- комбінований вихідний сигнал: два канали 4...20 мА, RS-485 (Modbus RTU).
- ергономічний корпус, зручність монтажу (на стелю або на стіну) та експлуатування.
- висока повторюваність:  $\pm 0,1$  %RH,  $\pm 0,1$  °С.
- висока стабільність: 0,25 %RH на рік, 0,02 °С на рік.

Перетворювачі ПВТ10 застосовуються для вимірювання параметрів повітряного середовища бібліотек, музеїв, фармацевтичних та інших лабораторій, овочесховищ, а також медичних, офісних, складських та виробничих приміщень. Зовнішній вигляд перетворювача представлений на рис. 3.3.



Рис. 3.3 - Датчик (перетворювач) вологості та температури повітря ПВТ10

### *Промисловий датчик вологості та температури ПВТ100*

Промисловий датчик температури та вологості ОВЕН ПВТ100 призначений для роботи в неагресивних середовищах. Здійснює безперервне перетворення значень температури та відносної вологості робочого середовища в два незалежні уніфіковані сигнали струму 4...20 мА. Виміряні значення передаються через інтерфейс RS-485 за протоколом Modbus RTU.

Особливості та функціональні можливості:

- температура вимірювання: -40...+80 °С.
- розширений діапазон вимірювання температури (до +120 °С) завдяки застосуванню високотемпературного кабелю.
- висока точність вимірювання: абсолютна похибка вимірювання вологості – до  $\pm 3,0\%$ , температури – до  $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- висока повторюваність результатів вимірювання:  $\pm 0,1\%$  RH,  $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- висока стабільність:  $\pm 0,25\%$  RH,  $\pm 0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$  на рік.
- два незалежні вихідні канали 4..20 мА.
- можливість обміну інформацією за інтерфейсом RS-485 (протокол Modbus RTU), швидкість до 57600 біт/с.
- розбірна конструкція, що дозволяє здійснювати заміну сенсора та/або фільтра зонда за необхідністю.
- ергономічний корпус зі ступенем захисту IP65.

Основна область застосування ОВЕН ПВТ100 - системи вентилявання та кондиціонування. Сенсори можуть розміщуватися у каналах припливної вентиляції, повітроходах та димоходах, сушильних, коптильних та холодильних камерах, овоче- та зерносховищах, у тому числі неопалювальні приміщення з важкими температурними умовами.



Рис. 3.4 - Промисловий датчик вологості та температури ПВТ100

Порівняємо технічні характеристики вологомірів, представлені в таблиці .

Таблиця 3.2 - Порівняльні технічні характеристики вологомірів

Параметр	ПВТ10	ПВТ100
Діапазон вимірювання вологості повітря,%	0 - 95	0 - 100
Основна абсолютна похибка - не більше,%	± 3	± 3
Вихідний сигнал, мА	4- 20	4- 20
Робоча температура, ° С	-20..+70	-40 ...+ 80 (+120)

З огляду на універсальність, більш високої точності, розширеної функціональності вибираємо промисловий датчик вологості та температури ПВТ100.

### 3.1.2 Вибір засобів вимірювання температури

Так як промисловий датчик вологості та температури ПВТ100 містить в своєму складі ще й датчик температури, використовуємо його і для вимірювання температури навколишнього повітря. Технічні дані датчика температури ПВТ100 наведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 -Технічні характеристики промисловий датчик температури ПВТ100

Параметр	Значення
Діапазон вимірювання температури, ° С	-40 ...+ 80 (+120)
Основна абсолютна похибка - не більше,%	± 0,6
Ступінь захисту від води і пилу по ДСТУ тисяча чотириста двадцять п'ять	IP65
Вихідний сигнал, мА	4- 20

### 3.1.3 Вибір засобів вимірювання витрати повітря

#### *Регулятор потоку для вимірювання витрати повітря D - FL100*

Витратомір D-FL 100 працює за принципом вимірювання перепаду тиску. Зонд (усереднена трубка) має дві окремі камери, потік між якими створює перепад тиску. Таким чином визначається значення витрати. Розрахунок витратоміра на основі мікропроцесора D-FL 100-10 може використовуватися для перетворення об'ємної витрати середовища з фактичних умов у стандартні з урахуванням інших параметрів потоку, таких як абсолютний тиск і температура.

Застосування витратоміра повітря:

- вимірювання об'ємної витрати повітря чи димових газів при високих температурах потоку
- установки з великим або малим перерізом газопроводів
- вимірювання об'ємної витрати при високому тиску

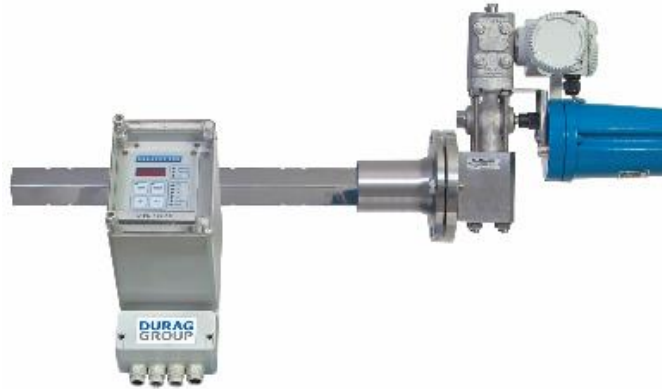


Рис. 3.5 - Регулятор потоку D-FL100 з осередненої трубкою

*Промисловий датчик для вимірювання швидкості повітря/газу EE75*

У термоанемометрах серії EE75 використовується високоякісний тонкоплівковий датчик виробництва E+E, який працює за інноваційним принципом гарячоплівкових анемометрів. Це гарантує максимальну чутливість і відмінну якість вимірювання навіть при найнижчих витратах. Вбудований температурний компенсатор знижує залежність датчиків серії EE75 від перепадів температури, а разом з високоміцним корпусом ці пристрої можна використовувати при температурах від  $-40$  до  $120$  °C.



Рис. 3.6 - Термоанемометр серії EE75

Таблиця 3.4 - Порівняльні технічні характеристики вимірників витрати повітря

Параметр	EE75	D-FL100
Діапазон вимірювання витрати, м <sup>3</sup> / год	0 - 3 · 10 <sup>6</sup>	0 - 3 · 10 <sup>6</sup>
Діапазон вимірювання швидкості, м / с	0 - 40	3 - 40
Межа виявлення, м / с	<0,1	<3
Основна абсолютна похибка - не більше, %	± 1	± 2
Температура повітря, газу - не більше, ° С	120	400
Діаметр газоходу, м	від 0,1	0,4 - 0,8
Вихідний сигнал, мА	4- 20	4- 20
Напруга живлення, В	24	24

Вибираємо термоанемометри серії EE75 через їхню вищу точність і розширений діапазон вимірювань .

#### 3.1.4 Вибір засобів вимірювання ваги

*Малогабаритний тензодатчик СМ. Це значення використовується для аналізу сили стиску .*

Переваги тензодатчиків СМ: компактність і легкість, низька ціна конструкція з нержавіючої сталі;



Рис. 3.7 - Малогабаритний тензодатчик СМ

#### *Датчик ваги С2-Е*

Основні характеристики:

- виготовлений з нержавіючих матеріалів;
- допускає велике динамічне навантаження;
- мала деформація;
- низькій профіль;

- 6-ти провідна схема підключення;
- відповідає вимогам по електромагнітної захисту згідно EN 45501;
- опція: вибухобезпечне виконання.



Рис. 3.8 - Датчик ваги С2-Е

Таблиця 3.5 - Порівняльні технічні характеристики вимірників ваги

Параметр	СМ	С2-Е
Діапазон вимірювання зусилля, т / с	0 - 2	0 - 2
Коефіцієнт передачі, мВ / В	1	2
Гістерезис, %	± 0,20	± 0,15
Основна абсолютна похибка - не більше, %	± 2	± 2
Робоча температура - не більше, ° С	-20 ... + 80	-30 ... + 120
Вхідний опір, Ом	750 ± 50%	340 ... 450
Вихідний опір, Ом	702 ± 2%	356 ± 0,2%
Напруга живлення, В	10	5

З огляду на більш високу точність та розширені межі робочих температур обираємо датчик ваги С2-Е.

*Перетворювач сигналів тензорезисторних датчиків 4507 ПА* призначений для перетворення сигналу мостового тензодатчика в напрузі постійного струму чи постійний струм. Перетворювач застосовується в системі виміру ваги, виміру сили, автоматичного дозування ваги та вимір потоків сипучих матеріалів, який витрачається. Перетворювач містить: джерело живлення датчиків; підсилювач сигналів датчиків; цифровий фільтр сигналів датчиків; схему формування вихідних сигналів. Перетворювач працює з одним мостовим тензорезисторний датчиком або групою датчиків (до 8), електрично паралельно з'єднаних між собою. Джерело живлення датчиків забезпечує максимальний струм до 150 мА. Довжина з'єднувального кабелю від перетворювача до датчика повинна бути не більше ніж 250 м. Живлення перетворювача відбувається за допомогою мережі змінного струму 220 В (+ 10 / -15) %, частотою (50 ± 1) Гц.

Параметри виходів перетворювача

- по току при максимальному опорі навантаження 400 Ом:
- аналоговий вихід 1 - від 0 до 5 мА;
- аналоговий вихід 2 - від 0 до 20 мА;
- аналоговий вихід 3 - від 4 до 20 мА;

По напрузі постійного струму від 0 до 10В при максимальному опорі навантаження 2 кОм.

Перетворювач забезпечує висновок інформації та результату вимірювання у зовнішній ланцюга в стандарті RS232; RS-485. Та має таку коротку характеристику:

- габаритні розміри - 155 x 155 x 81 мм.
- маса - 1,5 кг.
- споживана потужність - 10 ВА.



Рис. 3.9 - Перетворювач сигналу тензорезисторних датчиків 4507 ПА

### 3.1.5 Вибір датчиків положення візка

*Датчик фотоелектричний С-113 PHOTOSWITCH Серія 5000 "Синя" лінія*

Датчик "синьої" лінії серії 5000 з швидким з'єднанням є низьковольтним фотоелектричним датчиком з включенням / виключенням постійного струму. Є п'ять режимів виявлення, що включають зворотне відображення, поляризоване зворотне відображення і стандартну дифузію. Два виходу, один NPN і один PNP, максимізують логіку постійного струму і можливості взаємодії з навантаженням. Блоки живлення як з клеммами, так і з кабелем, забезпечують гнучкість при монтажі і підключенні проводів. особливості:

- регулювання чутливості;
- перемикач на вибір світлової або темної роботи.



Рис. 3.10 - Датчик фотоелектричний С-113 PHOTOSWITCH Серія 5000 "Синя" лінія

#### *Фотоелектричний датчик OMRON E3G*

Широкий спектр застосувань. Нечутливий до шумів, виробленим частотним перетворювачем. Компактний, легко встановлюється і підключається. Сімейство фотоелектричних датчиків E3G включає в себе датчики на перетин променя, на відображення від об'єкта і відображення від рефлектора, забезпечені функціями придушення впливу ближнього і далекого фону. Датчики не вимагають застосування спеціальних засобів захисту від електричних перешкод, створюваних такими пристроями як перетворювачі частоти, мобільні телефони. Ступінь захисту IP 67. Незважаючи на малий розмір, датчики цієї серії перевершують за своїми характеристиками аналогічні датчики, і, завдяки збільшеній потужності, можуть легко замінити датчики більшого розміру.



Рис. 3.11 - Фотоелектричний датчик OMRON E3G



Таблиця 3.6 - Порівняльні технічні характеристики датчиків положення

Параметр	3-113	E3G
Дистанція спрацьовування, м	0,5 - 10	0,5 - 10
Кут зору, °	2,5	1 ... 5
Гістерезис,%	10	10
Час спрацювання, мс	1	1,2
керуючий вихід	PNP / NPN	PNP / NPN
Струм навантаження, мА	не більше 100	не більше 100
Струм споживання, мА	не більше 35	не більше 50
Напруга живлення, В	10 ... 30	10 ... 30
Робоча температура - не більше, ° С	-40 ... + 65	-25 ... + 55

З огляду на більш високій точності і розширеному межі робочих температур вибираємо фотодатчик С-113.

### 3.1.6 Вибір датчиків положення дверей

*Індуктивні безконтактні вимикачі* мають чутливий елемент у вигляді котушки індуктивності з відкритим в бік активної поверхні магнітопроводом. Перед активною поверхнею вимикача утворюється електромагнітне поле. При внесенні металевго об'єкта в це поле коливання генератора загасають, демодульована напруга падає, тригер перекидається, комутаційний елемент перемикається. Зазвичай на практиці об'єкт впливу для безконтактного вимикача виготовляється у вигляді сталеві пластина необхідних розмірів, з'єднаної з рухомою деталлю механізму, положення якої потрібно контролювати.

Індуктивні безконтактні вимикачі найбільш ефективно використовувати в якості кінцевих вимикачів в автоматичних лініях, верстатах і т.п., так як вони спрацьовують тільки на метали і не чутливі до рештою матеріалів. Це збільшує їх захищеність від перешкод; наприклад, введення в зону чутливості вимикача рук оператора, емульсії, води, мастила і т.д. не призведе до помилкового спрацьовування.

Об'єктом впливу для індуктивних безконтактних вимикачів є металеві деталі: зуби шестерень, кулачки, повзуни; часто це металева пластина, прикріплена до відповідної деталі обладнання.

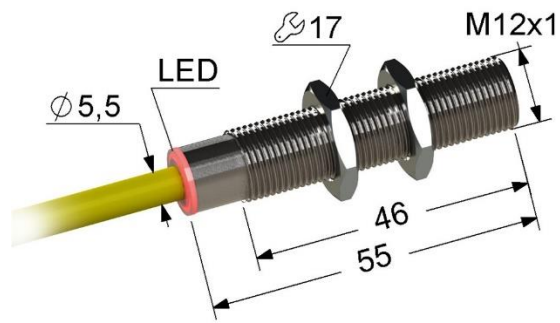


Рис. 3.12 - Індуктивний вимикач ВБ2.12М



Рис. 3.13 - Індуктивний вимикач PRL18-5DN

Таблиця 3.7 - Порівняльні технічні характеристики індуктивних вимикачів

Параметр	ВБ2.12М	PRL18-5DN
Дистанція спрацювання, мм	0 - 3,2	0 - 10,5
Гістерезис, %	15	10
Час спрацювання, мс	1,5	5
керуючий вихід	PNP / NPN	PNP / NPN
Струм навантаження, мА	не більше 300	не більше 200
Струм споживання, мА	не більше 8	не більше 10
Напруга живлення, В	10 ... 30	10 ... 30
Робоча температура - не більше, ° С	-40 ... + 105	-25 ... + 70

З огляду на більш високій здатності навантаження і розширеному межі робочих температур вибираємо індуктивний вимикач ВБ2.12М.

### 3.1.7 Вибір регулюючих органів

Заслінка повітряна прямокутна АЗД190 з електроприводом МЕОФ-40 / 25-0,25К призначені для регулювання кількості повітря і невибухонебезпечних газопароповітряних сумішей, агресивність яких по відношенню до вуглецевої сталі звичайної якості не вище агресивності повітря з температурою до 120 ° С, що не містять липких речовин і волокнистих матеріалів, з вмістом пилу

та інших твердих домішок у кількості не більше  $100 \text{ мг / м}^3$  в вентиляційних системах з тиском до  $1500 \text{ Па}$  ( $150 \text{ кгс / м}^2$ ) і швидкістю переміщення середовища до  $20 \text{ м / с}$ .

Розміри перетинів заслінок відповідають розмірам поперечних перерізів повітропроводів по положенню 21 БНІП 2.04.05-91. Приєднувальні розміри по фланців заслінок відповідають розмірам по ДСТУ 26270-84 "Фланці вентиляційні".

Заслінка є корпус з тонколистової сталі, з двома фланцями для приєднання до повітропроводів. У середині корпусу на осях встановлені від однієї до трьох лопаток, на які за допомогою системи тяг і важелів, передається рух від приводу, укріпленого на корпусі заслінки. Лопатки заслінки легко повертаються на осі на кут до  $90$  градусів відносно площини клапана. Для заслінок АЗД 190.000-00 ... 05 в якості електроприводу застосовуються механізми виконавчі електричні однооборотні типу МЕОФ-40 / 25-0,25К.

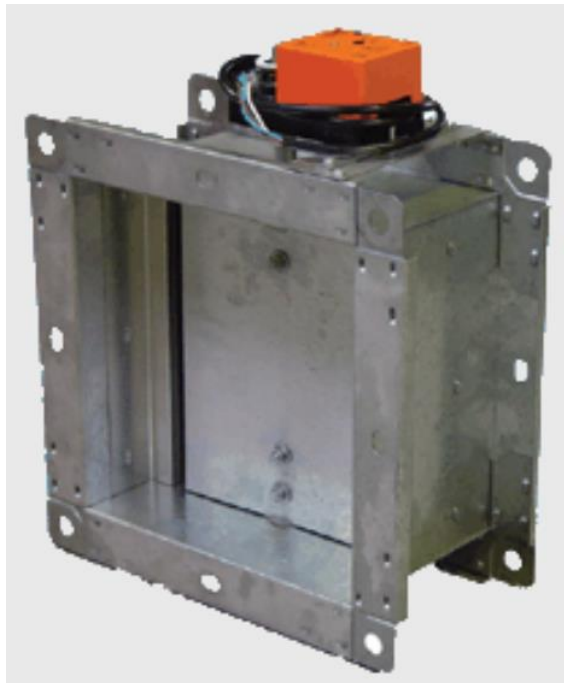


Рис. 3.14 - Заслінка повітряна прямокутна АЗД 190 з електроприводом МЕОФ-40 / 25-0,25К

### 3.1.8 Вибір виконавчого механізму

Виконавчим механізмом (ВМ) в системі автоматичного регулювання називається пристрій, що переміщує регулюючий орган відповідно до сигналів, які надходять від підсилювача. Виконавчі механізми створюють поступальний або обертальний рух, призначене для переміщення регулюючого органу. До них ставляться такі конструктивні і експлуатаційні вимоги:

- простота конструкції;
- мінімальні розміри і маса;

- висока надійність і стійкість до впливу зовнішнього середовища;
- Безпечна експлуатація і стійкість в роботі;
- наявність захисту для запобігання регулюючого органу від перевантажень і поломок і можливості ручного управління при відмові схеми управління або порушення енергопостачання;
- наявність дистанційного контролю положення регулюючого органу.

Виконавчі механізми поділяють в залежності від виду споживаної енергії на електричні, пневматичні, гідравлічні, вантажні і пружинні.

В даній схемі використовується механізм виконавчий електричний однооборотний постійної швидкості МЕОФ-40 / 25-0,25К. Він має такі особливості:

- автоматичне, дистанційне або ручне відкриття / закриття трубопровідної арматури;
- автоматичний і дистанційний зупинник робочого органу арматури в будь-якому проміжному положенні;
- позиціонування робочого органу трубопровідної арматури в будь-якому проміжному положенні;
- формування інформаційного сигналу про кінцевих і проміжних положеннях робочого органу арматури і динаміці його переміщення;

Таблиця 3.8 - Параметри електровиконавчого механізму МЕОФ-40 / 25-0,25К

Параметр	Значення
Номінальний крутний момент, Н · м	40
Час повного ходу вихідного валу, з	25
Номінальний хід вихідного валу, °	90
Напруга живлення, В	3 фази, 220В
Споживана потужність, Вт	110
Блок сигналізації положення вихідного валу	БСПТ
Уніфікований вихідний сигнал, мА	4- 20
Нелінійність датчика блоку сигналізації положення, %	± 2,5

Для управління механізмом МЕВ спеціально розроблений пускач безконтактний реверсивний ПБР-3А, який забезпечує пуск, реверс і захист трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором від перевантаження.

Таблиця 3.9 - Параметри пускача безконтактного реверсивного ПБР-3А

Параметр	Значення
Вхідний сигнал	Імпульси синусоїдальної напруги 24 ... 26В
Вхідний опір, Ом	750
Максимальна напруга, що комутується, В	220/380
Максимальний комутований струм, А	3
Швидкодія, мс	25
Напруга джерела живлення ланцюгів управління, В	22 ... 26
Споживана потужність, Вт	7



Рис. 3.15 - Пускач безконтактний реверсивний ПБР-3А

### 3.1.9 Вибір пристроїв плавного пуску

Пристрій плавного пуску (ППП) - електротехнічний пристрій, що використовується в асинхронних електродвигунах, яке дозволяє під час запуску утримувати параметри двигуна (струму, напруги і т.д.) в безпечних межах. Його застосування зменшує пускові струми, знижує ймовірність перегріву двигуна, усуває ривки в механічних приводах, що, в кінцевому підсумку, підвищує термін служби електродвигуна.

Призначення: управління процесом запуску, роботи і зупинки електродвигунів. Основними проблемами асинхронних електродвигунів є:

- неможливість узгодження крутного моменту двигуна з моментом навантаження,
- високий пусковий струм.

Під час пуску крутний момент за частки секунди часто досягає 150- 200%, що може привести до виходу з ладу кінематичного ланцюга приводу. При цьому стартовий струм може бути в 6 - 8 разів більше номінального, породжуючи проблеми зі стабільністю живлення. Пристрої плавного пуску дозволяють уникнути цих проблем, роблячи розгін і гальмування двигуна більш повільними. Це дозволяє знизити пускові струми і уникнути ривків в механічній частині приводу або гідравлічних ударів в трубах і засувках в момент пуску і зупинки двигунів.

## Принцип дії

Основною проблемою асинхронних електродвигунів є те, що момент сили, що розвивається електродвигуном, пропорційний квадрату прикладеної до нього напруги, що створює різкі ривки ротора при пуску і зупинці двигуна, які, в свою чергу, викликають великий індукційний струм.

Пристрої плавного пуску дозволяють поступово підвищувати струм або напруга від початкового зниженого рівня (опорного напруги) до максимального, щоб плавно запустити і розігнати електродвигун до його номінальних оборотів. Такі ППП зазвичай використовують амплітудні методи управління і тому справляються з запуском обладнання в холостому або слабо навантаженому режимі. Більш сучасне покоління ППП (наприклад, пристрої ЕнерджіСейвер) використовують фазові методи управління і тому здатні запускати електроприводи, що характеризуються важкими пусковими режимами "номінал в номінал". Такі ППП дозволяють виробляти запуски частіше і мають вбудований режим енергозбереження і корекції коефіцієнта потужності.

Для вибору ППП необхідно знати тип електродвигуна, яким належить керувати. У сушильній камері використовується наступне обладнання з електродвигунами, якими необхідно управляти за допомогою ППП:

- електротельфер (електродвигун АГД100L8 - 1,5 кВт) - 4 шт;
- електролафети (електродвигун 4АМ250S7У3 - 25кВт) - 1шт.

На ринку присутні багато фірм виробників пристроїв плавного пуску, кожна з яких має в своєму складі велику номенклатуру і специфічні особливості пропонованих пристроїв. Розглянемо деякі з них:

*Реверсивні пристрої плавного пуску, Динамічного гальмування і захисту серії «БіСТАРТ-Р»* призначені для ненаголошеного або плавного пуску двигуна, динамічного гальмування і реверсу трифазних асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором, а також для комплексної інтелектуальної захисту двигуна і механізму. Пристрої плавного пуску "БіСТАРТ-Р" є багатофункціональними реверсивні тиристорні пускачі і можуть замінювати традиційні реверсивні збірки з магнітних пускачів і додаткових пристроїв захисту і динамічного гальмування двигуна.

Переваги використання реверсивних пристроїв плавного пуску, динамічного гальмування і захисту серії "БіСТАРТ-Р":

- компактні розміри;
- широкий діапазон потужностей від 0.1 до 30 кВт;
- висока надійність і довговічність завдяки безконтактної тиристорної комутації двигуна у всіх фазах;
- інтелектуальний захист двигуна і устаткування від позаштатних режимів роботи і діагностика несправностей;

- збільшення терміну служби двигуна і приводного механізму завдяки функціям ненаголошеного і плавного пуску;

- високоефективне гальмування постійним струмом без ударних навантажень на привід.

Завдяки використанню новітньої елементної бази, мікропроцесорного управління і запатентованої схеми управління силовими ключами пристрою плавного пуску і динамічного гальмування «БіСТАРТ-Р» є компактними і недорогими пристроями.



Рис. 3.16 - Реверсивні пристрої плавного пуску серії «БіСТАРТ-Р»

#### *Пристрій плавного пуску RVS-DN 8 - 2700A*

RVS-DN являє собою складне і високонадійне пристрій плавного пуску, розроблене для використання зі стандартними трифазними асинхронними двигунами з короткозамкненим ротором. Він забезпечує оптимальний спосіб зниження струму і моменту під час пуску двигуна.

RVS-DN запускає двигун шляхом подачі на нього повільно наростаючої напруги, забезпечуючи м'який пуск і плавний розгін за допомогою мінімального струму, необхідного для запуску двигуна.

Друге покоління цифровий мікропроцесорної техніки надає унікальні можливості по управлінню насосом, використанню малої швидкості, електронного реверсу і надійному захисті двигуна. Додатково може бути поставлена опція входу для підключення термістора і інші опції, а також змінена ступінь захисту приладу.



Рис. 3.17 - Реверсивні пристрої плавного пуску RVS-DN

Проведемо порівняльний аналіз пристроїв плавного пуску стосовно до двигуна електротельфера.

Таблиця 3.10 - Порівняльні технічні характеристики пристроїв плавного пуску

Параметр	БСТ-6Р	RVS-DN
Номинальна напруга мережі частоти 50Гц, В	3x380	220 ... 440
Комутований струм двигуна при тривалому включенні, А	6,5	8
Потужність підключається двигуна, кВт	0,4 ... 2,2	4
Діапазон настройки номінального струму, А	1,0 ... 6,5	4 ... 8
Максимальний пусковий струм двигуна протягом 3с, А	60	30
Допустимий струм короткого замикання в теч. 10мс, А	500	450
Швидкодія, мс	50	40
Час розгону, з	0,2 ... 10	1 ... 30
Час гальмування, з	0,2 ... 10	1 ... 30
Напруга живлення ланцюгів управління, В	24 ± 4	110 ... 230
Температура навколишнього середовища, ° С	-10 ... + 60	-25 ... + 50

З огляду на більш високій перевантажувальної здатності і уніфікованого напрузі живлення ланцюгів управління вибираємо для електротельфера пристрій плавного пуску БСТ-6Р

Для двигуна електролафета вибираємо більш потужний пристрій плавного пуску БСТ-60Р того ж виробника. Його параметри представлені в таблиці 3.11.



Таблиця 3.11 - Параметри пристроїв плавного пуску БСТ-60Р

Параметр	Значення
Номинальна напруга мережі частоти 50Гц, В	3x380
Комутований струм двигуна при тривалому включенні, А	60
Потужність підключається двигуна, кВт	22 ... 30
Діапазон настройки номінального струму, А	44 ... 74
Максимальний пусковий струм двигуна протягом 3с, А	360
Допустимий струм короткого замикання в теч. 10мс, А	1700
Швидкодія, мс	50
Час розгону, з	0,2 ... 10
Час гальмування, з	0,2 ... 10
Напруга живлення ланцюгів управління, В	24 ± 4
Температура навколишнього середовища, ° С	-10 ... + 60

### 3.1.10 Вибір частотного перетворювача

Для стабілізації параметрів роботи сушильної камери управління наступним обладнанням повинно проводитися за допомогою частотних перетворювачів:

- вентилятор теплогенератора ТВС-8 (електродвигун АІР180М8 15кВт) - 1шт;
- витяжний вентилятор нагрітого повітря ВР 80-75 №12,5 (електродвигун 5А200М8 18,5кВт) - 1шт;
- вентилятор циркуляції повітря в камерах №1, №2, №3 МВТ-120-470-15Р (лопаті на валу електродвигуна 5,5 кВт) - 3шт.

Розглянемо пропозиції фірм виробників частотних перетворювачів, наявних на ринку:

#### *Частотні перетворювачі TOSHIBA серії ES*

Серія частотних перетворювачів ES характеризується конкурентоспроможними цінами, широкими можливостями по керованості і контролю і великою глибиною регулювання швидкості. Перетворювачі випускаються на номінальну напругу 220В і 380В і на номінальні потужності від 0,75 до 75 кВт. Частотні перетворювачі цієї серії використовуються з асинхронними трифазними двигунами змінного струму загальнопромислового призначення. Серія частотних перетворювачів ES012 задовольняє всім вимогам, що пред'являються до сучасних перетворювачів частоти для загальнопромислового приводу і приводу з «вентиляторної» навантаженням. Частотні перетворювачі серії ES012 здатні створювати підвищений крутний момент і забезпечувати високу точність управління в широкому діапазоні частот.

### Частотні перетворювачі HITACHI серії SJ200

Прогресивне рішення виробника в сфері управління електроприводами, які вимагають високого крутного моменту, стабілізації швидкості обертання в діапазоні регулювання. трифазне живлення-потужність від 0,75 до 132 кВт. Інвертори мають: моделювання вольт-частотної характеристики; векторне управління моментом; динамічне гальмування; режим енергозбереження; автоматичне налаштування на двигун; двоступеневий ПІД-регулятор; три програмних набору; інтерфейс RS485.

Застосування: вентилятори, млини, екструдери, пилогами, підйомники, мішалки, крани, ліфти і т.д.

Для вибору виробника порівнюємо технічні характеристики частотних перетворювачів для управління двигуном 5A200M8 витяжного вентилятора нагрітого повітря потужністю 18,5кВт: TOSHIBA ES012-04-0390F і HITACHI SJ300-450HF.

Таблиця 3.12 - Порівняльні характеристики частотних перетворювачів

Параметр	TOSHIBA ES012-04-0390F	HITACHI SJ300-185HF
Потужність застосовуваного двигуна, кВт	18,5	18,5
Вхідна напруга, В	3 фази 200 ... 260	3 фази 200 ... 240
Номинальна потужність, кВт	25,7	60
Номинальний вихідний струм, А	39	38
метод управління	ШИМ	ШИМ
Вихідна частота, Гц	0 - 400	0,1 - 400
Пусковий момент, %	150	150
Точність підтримки швидкості, %	± 0,5	± 0,5
Управління	0 - 5В 0 - 10В 4 - 20мА RS485	0 - 5В -5 - +5 В 0 - 10В -10 - +10 В 4 - 20мА RS485
Захист	по току, по напрузі, від перегріву, КЗ, пропажа фази	по току, по напрузі, від перегріву, КЗ, пропажа фази

Розглянуті пристрої практично однакові за параметрами, але пристрій виробництва TOSHIBA має більший діапазон живлячих напруг і вихідний струм. Тому для управління двигуном 5A200M8 витяжного вентилятора нагрітого повітря вибираємо частотний перетворювач TOSHIBA ES012-04-0390F.

Обраний частотний перетворювач TOSHIBA ES012-04-0390F так само підходить для управління двигуном AIP180M8 вентилятора теплогенератора ТВС-8 потужністю 15кВт. Відповідно для інших вентиляторів циркуляції повітря в камерах №1, №2, №3 MBT-120-470-15P з двигуном потужністю 5,5 кВт також будемо використовувати частотні перетворювачі виробництва TOSHIBA ES012-04-0130F. Його параметри представлені в таблиці 3.13.

Таблиця 3.13 - Параметри частотного перетворювача TOSHIBA ES012-04-0130F

Параметр	Значення
Потужність застосовуваного двигуна, кВт	5,5
Вхідна напруга, В	3 фази 200 ... 260
Номінальна потужність, кВт	8,6
Номінальний вихідний струм, А	13
метод управління	ШИМ
Вихідна частота, Гц	0 - 400
Пусковий момент,%	150
Точність підтримки швидкості,%	± 0,5
Управління	0 - 5В 0 - 10В 4 - 20мА RS485
Захист	по току, по напрузі, від перегріву, КЗ, пропажа фази

### 3.1.11 Вибір пристрою живлення

Для живлення датчиків і пристроїв сполучення з МК необхідно напруга 24В постійного струму. З огляду на невеликий струм кожним пристроєм, можна використовувати автономні блоки, від яких живиться кілька пристроїв. Так як особливих експлуатаційних вимог до блокам живлення не пред'являється, то в якості типового вибираємо блок живлення DRP024V060W1AA виробництва фірми DELTA.

Таблиця 3.14 - Технічні характеристики блоку живлення DRP024V060W1AA

Параметр	Значення
Напрузі мережі живлення, В	85 - 264
Частота мережі, Гц	47 - 63
Вхідний струм, А	0,7
ККД, %	85
Вихідна потужність, Вт	60
Вихідна напруга, В	22 - 28
Вихідний струм навантаження, А	2,5

### 3.2 Вибір системи управління об'єктом автоматизації

Системи управління об'єктом автоматизації можуть бути в окремих випадках однорівневими централізованими, і багаторівневими. Однорівневі системи управління, в яких управління об'єктом здійснюється з одного пункту управління, називаються централізованими. Однорівневі системи, в яких окремі частини складного об'єкта управляються з самостійних пунктів управління, називаються децентралізованими.

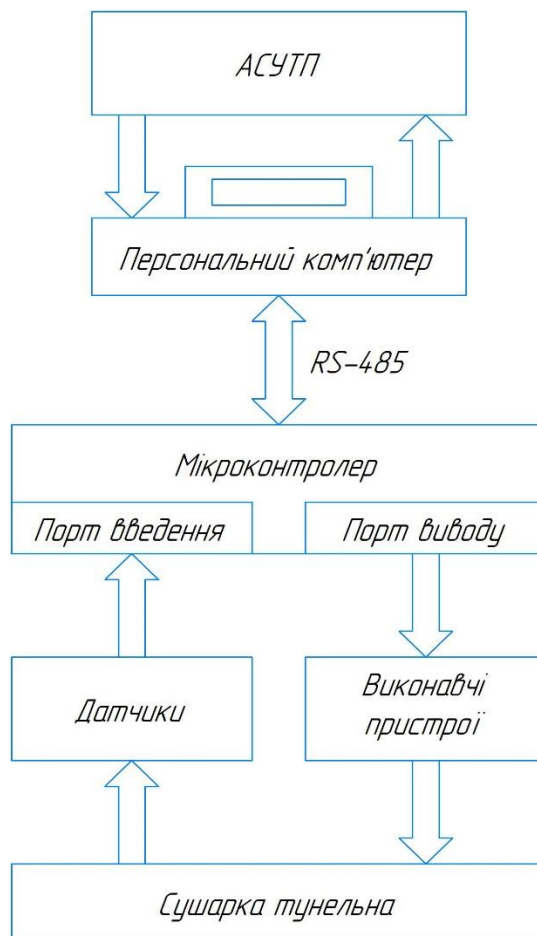
Однорівневі централізовані системи застосовуються в основному для управління відносно нескладними об'єктами або об'єктами, розташованими на невеликій території. Більшість промислових об'єктів, в тому числі тунельна сушка цегли-сирцю, в даний час представляють собою складні комплекси.

Якщо управління такого комплексного об'єкта побудувати по однорівневій централізованій системі, то набагато ускладняться комунікації системи управління, різко зростуть витрати на її спорудження та експлуатацію, центральний пункт управління вийде громіздким. Переробка інформації, велика частина якої є непотрібною для безпосереднього ведення технологічного процесу, представляє великі труднощі. Відстань пункту управління від того чи іншого допоміжного підоб'єкту ускладнює прийняття оперативних заходів щодо усунення тих чи інших неполадок. У цьому випадку більш прийнятною стає однорівнева децентралізована система управління.

Однак за допомогою однорівневих систем не завжди представляється можливим оптимально вирішити питання управління технологічними процесами. Це в першу чергу відноситься до складних технологічних процесів. Тоді доцільно переходити до багаторівневим системам управління.

Прийнявши до уваги організацію процесу сушіння цегли-сирцю, топологію об'єкта та розподіл функціональних елементів технологічного процесу по підприємству, вибираємо 3-х рівневу систему управління. В якій нижній рівень становлять локальні системи збору та обробки

інформації; середній рівень - мікроконтролер, керуючий технологічним процесом і верхній рівень - автоматизоване робоче місце. Структурна схема автоматизації процесу сушіння цегли-сирцю представлена на рис. 3.18.



АСУ ТП - автоматизована система управління технологічним процесом;

RS-485 - інтерфейс

Рис. 3.18 - Структурна схема автоматизації процесу сушіння цегли-сирцю

Нижній рівень автоматизованої системи управління технологічним процесом, що складається з локальних систем збору і обробки інформації, призначений для координації роботи локальних регуляторів через мікроконтролер і автоматизоване робоче місце.

На даному рівні знаходяться датчики і виконавчі пристрої. Основний концептуальної лінією вибору датчиків і виконавчих механізмів на даному рівні є дешевизна, зручність монтажу та обслуговування. Також важлива уніфікованість приладів під сучасні засоби прийому, передачі та обробки інформації.

Середній рівень автоматизованої системи управління технологічним процесом (пристрої зв'язку з об'єктами) включає в себе програмно-апаратні модулі на базі програмованого логічного контролера (ПЛК), пристрої введення-виведення аналогових і дискретних сигналів, комунікаційні модулі, мережеве обладнання.

В автоматичній системі керування сушінням цегли-сирцю мікропроцесорний контролер забезпечує:

- збір інформації від перетворювачів сигналів нижнього рівня;
- фільтрацію, лінеаризацію і масштабування вхідних аналогових сигналів;
- моніторинг технологічного процесу;
- регулювання процесів відповідно до заданих критеріїв верхнього рівня;
- захист обладнання;
- ретрансляцію технологічних параметрів на верхній рівень;
- подачу керуючих сигналів на виконавчі механізми.

Головними критеріями вибору контролера є швидкодія, спряженість інтерфейсів, кількість каналів управління.

На верхньому рівні розташована операторська станція з автоматизованим робочим місцем (АРМ) і сервер системи. На сервері системи розташовується вся архівна інформація, база даних, ПО контролерів. На операторській станції відображається мнемосхема об'єкта, з усіма поточними, вимірюваними параметрами і оператор веде технологічний процес, маючи всю потрібну інформацію на екрані монітора.

До складу автоматизованого робочого місця (АРМ) входить IBM PC комп'ютер з встановленою операційною системою Windows XP, процесором AMD Sempron LE-140 (2.7GHz), ОЗУ 1024MB DDR2 і встановленим програмним комплексом.

### **3.3 Вибір мікроконтролера.**

З аналізу обсягу надходить і керуючої інформації, яка представлена в таблиці 3.15 – «Таблиця вхідних сигналів» і в таблиці 3.16 – «Таблиця вихідних сигналів» впливає, що контролер повинен забезпечувати:

- 2 сигналу зв'язку по протоколу RS-485;
- 18 вхідних аналогових сигналів від стандартних датчиків з діапазоном струму 4 - 20 мА;
- 13 вхідних дискретних сигналів від датчиків положення;
- 5 вихідних аналогових сигналів управління з діапазоном струму 4 - 20 мА до частотним перетворювачів;
- 11 дискретних вихідних сигналів управління пристроями плавного пуску приводів заслінок, електротельферів і електролафета.

Так як всі контрольовані і керовані технологічні процеси повільно поточні [ , то прийнятним часом між дискретними циклічними опитуваннями керованого процесу для обраного контролера може бути 1 с.

Для поставленої задачі можливо використовувати як ПЛК - програмовані логічні контролери так і PC-based автоматику, яка базується на промисловому комп'ютері.

Беручи до уваги тривалий час циклу опитування датчиків і видачі керуючого впливу, можна зробити висновок, що необхідність у використанні швидкодіючої але дорожчий PC-based автоматики немає.

Сформульовані вимоги можуть забезпечити такі контролери:

*Контролер ОВЕН ПЛК160 з модулем віддаленого виведення ОВЕН МВУ8*

Контролер ОВЕН ПЛК160 призначений для побудови розподілених систем управління і диспетчеризації з використанням як провідних, так і бездротових технологій. Контролери виконані в компактному DIN-рейковому корпусі. Розширення кількості точок введення-виведення здійснюється шляхом підключення зовнішніх модулів вводу-виводу за допомогою одного з вбудованих інтерфейсів. У контролері спочатку закладені потужні обчислювальні ресурси при відсутності операційної системи:

- високопродуктивний процесор RISC архітектури ARM9, з частотою 180МГц компанії Atmel;
- обсяг оперативної пам'яті - 8МБ;
- обсяг постійної пам'яті - Flash пам'ять, 4МБ;
- обсяг енергонезалежної пам'яті, для зберігання значень змінних - до 16КБ;
- час циклу за замовчуванням становить 1мс при 50 логічних операціях, при цьому він відключений обміну;
- широкі можливості самодіагностики контролера;
- вбудований акумулятор, що дозволяє «перечікувати» пропая живлення - виконувати програму при пропажі живлення, і переводити вихідні елементи в «безпечний стан». Час «перечікування» налаштовується користувачем при створенні проекту;
- вбудований годинник реального часу;
- можливість створювати і зберігати архіви на Flash контролера.

Технічні характеристики:

- аналогові входи - 8 уніфікованих;
- аналогові виходи - 12;
- дискретні входи - 16;
- дискретні виходи - 12;
- мережа Ethernet 10/100 - 1;
- RS-232, RS-485 - 3;
- USB для програмування контролера - 1



Рис. 3.19 - Контролер ОВЕН ПЛК160

*Контролер ОВЕН ПЛК200* – лінійка моноблокових контролерів для малих і середніх систем автоматизації з вбудованими аналоговими і дискретними входами/виходами (DI/DO/AI/AO). Контролери універсальні завдяки широкому спектру комунікаційних протоколів.

Він має такі переважні характеристики:

- Великий обсяг пам'яті:
  - ROM 512 Мбайт (NAND).
  - RAM 256 Мбайт (DDR3).
  - RETAIN 64 Кбайт (MRAM).
- Процесор ARM® Cortex-A8 з частотою 800 МГц.
- Операційна система Linux з RT-патчем.
- Підтримка швидких входів/виходів до 95 кГц на виділеному PRU.
- Кріплення на стіну або DIN-рейку.
- Знімні клемники з невипадаючими гвинтами.
- Зручна система укладання кабелю.
- Тумблер Старт/Стоп і з'єднувач для MicroSD-карти під кришкою.
- Ethernet дає ряд переваг:
  - висока швидкість опитування;
  - мультимастерність;
  - варіативна топологія мережі.
- Підтримка протоколів Modbus RTU / ASCII / TCP, OPC UA (Server), MQTT, NTP.
- Вбудований Firewall.
- Підтримка Web-візуалізації CODESYS.
- Web-інтерфейс для налаштування і діагностики контролера.
- Просте підключення до OwenCloud.
- Розширений діапазон напруги живлення: =10 ... 48 В.



- Розширений діапазон температури навколишнього середовища:  $-40\dots+55\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



Рис. 3.20 - Контролер ОВЕН ПЛК200

Оцінивши найбільш важливі параметри можна сказати, що контролер ОВЕН ПЛК200 володіє всіма необхідними властивостями. Хоча контролер ОВЕН ПЛК 160 також володіє схожими параметрами, йому недостатньо необхідної кількості аналогових входів. До того ж ОВЕН ПЛК200 є вдосконаленою версією ОВЕН ПЛК160.

### 3.3 Компонування схеми автоматизації

Розробка проекту автоматизації процесу виготовлення цегли виробляється на основі функціональної схеми.

Компонування обладнання та лінії зв'язку представлені на схемі електричної з'єднань.

У приміщенні підготовки повітря встановлені теплогенератор ТВС-8 і витяжний вентилятор ВР 80-75 №12,5. Для подачі гарячого повітря в сушильні камери і видалення нагрітого повітря є два окремих магістральних повітропроводи виготовлені з оцинкованого заліза. Повітропровід гарячого повітря з'єднується з теплогенератором, який нагнітає в нього гаряче повітря. Повітропровід нагрітого повітря з'єднується з витяжним вентилятором, який видаляє нагріте повітря в атмосферу. Управління продуктивністю теплогенератора і витяжного вентилятора проводиться мікро контролером шляхом подачі керуючого сигналу на частотні перетворювачі.

Перед кожною камерою зроблені відводи від магістральних повітропроводів. На цих відводах змонтовані заслінки повітряні прямокутні АЗД190 з електроприводом МЕОФ-40 / 25-0,25К. За допомогою цих заслінок проводиться регулювання витрати подаваного в камеру гарячого повітря і відведеного з камери нагрітого повітря. Ступінь відкриття заслінок контролюється вбудованим датчиком положення, який виробляє уніфікований сигнал 4-20 мА. Витрата гарячого

повітря вимірюється термоанемометром, первинний перетворювач якого встановлений після регулюючої заслінки. Крім того в кожній з камер встановлені вентилятори циркуляції повітря.

Первинні перетворювачі датчиків вимірювання температури і вологості повітря і ваги вагонетки встановлюються безпосередньо на обладнанні в блоках сушильної камери. За допомогою датчиків положення контролюється стан дверей, які поділяють камери і положення вагонетки.

Інформація від датчиків по лініях зв'язку передається в шафу управління, розташований в службовому приміщенні КВПіА.

У шафі КВПіА також змонтований промисловий контролер, пам'ять якого запрограмована на забезпечення функціонування технологічного обладнання відповідно до обраного алгоритму управління. Там же розташовані засоби управління приводами і виконавчими механізмами (пристрої плавного пуску, частотні перетворювачі).

Засоби управління приводами повітряних заслінок, електротельферів, електролафета, вентилятора теплогенератора, вентиляторів циркуляції і витяжки повітря харчуються від 3-х фазної промислової мережі змінного струму. Захист силових ланцюгів забезпечується автоматичними вимикачами.

Живлення датчиків і засобів сполучення з промисловим контролером здійснюється за допомогою локальних блоків живлення DRP024V060W1AA 24В 2,5А.

### **3.4 Вхідні-вихідні сигнали для вибору периферійних пристроїв**

Складемо таблицю вхідних і вихідних сигналів системи, для того, щоб узгодити їх і вибрати периферійні пристрої. Вхідні сигнал для системи управління представлені в таблиці 3.15, вихідні сигнали управління - в таблиці 3.16.

На підставі даних таблиці 3.15 і таблиці 3.16 є:

- 2 сигналу зв'язку по протоколу RS-485;
- 18 вхідних аналогових сигналів від стандартних датчиків з діапазоном 4 - 20 мА;
- 13 вхідних дискретних сигналів від датчиків положення;
- 5 вихідних аналогових сигналів управління з діапазоном струму 4 - 20 мА до частотним перетворювачів;
- 11 дискретних вихідних сигналів управління пристроями плавного пуску приводів заслінок, електротельферів і електролафета.

Таблиця 3.15 - Таблиця вхідних сигналів

№ п/п	Сигнал	Датчик	Діапазон сигналу	Діапазон вимірювань	Точність	Діапазон контролю
1, 2	Вологість сирцю перед сушінням і після сушіння	Електронний вологомір Wintact WT630	RS-485	0,5 - 79,5	±1,5%	-
3-5	Положення заслінки гарячого повітря в камерах №1, №2, №3	Блок сигналізації положення вихідного валу БСПТ-10	4 – 20мА	0 – 90°	±2,5%	0 – 90°
6-8	Положення заслінки нагрітого повітря в камерах №1, №2, №3	Блок сигналізації положення вихідного валу БСПТ-10	4 – 20мА	0 – 90°	±2,5%	0 – 90°
9-11	Витрата гарячого повітря в камерах №1, №2, №3	Термоанемометр серії EE75	4 – 20мА	0 – 3·10 <sup>6</sup> м <sup>3</sup> /Г	±2%	0 – 6·10 <sup>3</sup> м <sup>3</sup> /ч
12-14	Вологість повітря в камерах №1, №2, №3	Датчик вимірювання вологості і температури ПВТ 100	4 – 20мА	0 – 100%	±3%	0 – 50%
15-17	Температура повітря в камерах №1, №2, №3	Датчик вимірювання вологості і температури ПВТ 100	4 – 20мА	-40...+80 (+120)°С	±0,6%	+20...+50 °С
18-20	Вага вагонетки і сирцю в камері №1, №2, №3	Датчик ваги С2-Е і перетворювач сигналів тензорезисторних датчиків 4507 ПА	4 – 20мА	0 – 2т	±2%	0 – 0,72т
21-25	Позиція вагонетки перед камерою №1, в камерах №1, №2, №3 та в зоні вивантаження	Датчик фотоелектричний С-113 Серія 5000 - "Синя" лінія	NPN и PNP 0 – 100мА	0,05 – 10м	±2%	0 – 5м
26-33	Положення розсувних дверей між камерами №1, №2, №3	Індуктивний безконтактний вимикач серії PR	NPN и PNP 0 – 10мА	0,5 – 15мм	±5%	0 – 10мм

Таблиця 3.16 - Таблиця вихідних сигналів

№ п/п	Сигнал	Діапазон сигналу	Тип сигналу	Виконавчий механізм	Примітка
1–3	Управління двигуном вентилятора циркуляції повітря в камерах №1, №2, №3	4 – 20 мА	ШІМ	МВТ-120-470-15Р	3 ф, ~220В, 5,5кВт, 15 – 120Гц
4	Управління двигуном витяжного вентилятора нагрітого повітря ВР 80-75 №12,5	4 – 20 мА	ШІМ	5А200М8	3 ф, ~220В, 18,5кВт, 15 – 120Гц
5	Управління двигуном вентилятора теплогенератора ТВС-8	4 – 20 мА	ШІМ	АІР180М8	3 ф, ~220В, 15кВт, 15 – 120Гц
6–8	Управління заслінкою гарячого повітря в камерах №1, №2, №3	0 – 24В	Дискрет.	МЕОФ-40/25-0,25К	3 ф, ~220В, 110Вт,
9–11	Управління заслінкою нагрітого повітря в камерах №1, №2, №3	0 – 24В	Дискрет.	МЕОФ-40/25-0,25К	3 ф, ~220В, 110Вт,
12–15	Управління двигуном електротельфера	0 – 24В	ШІМ	АГД100L8	3 ф, ~220В, 1,5кВт
16	Управління двигуном електролафета	0 – 24В	ШІМ	4АМ250S7У3	3 ф, ~220В, 25кВт

### 3.5 Алгоритм роботи системи управління

Сушильна камера працює в одному з 4-х режимів [22]: 1 підготовка до роботи; 2 - завантаження; 3 - сушка; 4 – розвантаження. Блок-схеми цих алгоритмів можна побачити в Додатку А. Для кожного з цих етапів розроблений відповідний алгоритм.

Підготовка до роботи проводиться при пуску сушильної камери після її зупинки на тривалий час. Перед початком роботи необхідно звільнити сушильні камери і зону вивантаження від вагонеток. Якщо в будь-якої з камер або в зоні вивантаження зафіксовано наявність вагонетки, система управління переходить в режим «Розвантаження». Якщо вагонетки не виявлені, проводиться закривання всіх дверей. Після того, як всі двері будуть закриті, відкриваються заслінки гарячого повітря, а заслінки нагрітого повітря закриваються. Теплогенератор і вентилятори циркуляції повітря в камерах №1, №2 та №3 включаються на 100% потужності, щоб забезпечити швидкий прогрів камер до температури завантаження. Коли умови завантаження будуть досягнуті, вентилятори циркуляції повітря відключаються, а теплогенератор переводиться в режим стабілізації температури. Цей алгоритм схематично показано в Додатку А (рис. А.1).

У режимі «Завантаження» проводиться переміщення вагонеток між зоною завантаження, камерами №1, №2, №3 і зоною вивантаження. Спочатку контролюється наявність вагонетки в зоні завантаження. У разі її відсутності оператору видається застережливий сигнал «Зона завантаження

не зайнята». При наявності вагонетки в зоні завантаження, проводиться вимірювання вологості і ваги цегли-сирцю перед сушінням. Далі перевіряється зона вивантаження. Якщо в зоні вивантаження залишилася вагонетка, її необхідно прибрати і для цього оператору видається застережливий сигнал «Зона вивантаження зайнята» і триває перевірка доти, поки зона вивантаження НЕ буде вільна. Коли зона вивантаження вільна - відбувається відкривання дверей. Після того, як двері будуть відкриті, включиться електролафети і вагонетки почнуть переміщатися вперед на 1 позицію. Як тільки буде зафіксовано досягнення вагонетками потрібної позиції, електролафети вимкнуться і надійде команда на закриття дверей. Якщо всі двері закриті - дозволяється перехід в режим «Сушка». Цей алгоритм можна подивитися в Додатку А (рис. А.2).

У режимі «Сушка» проводиться вимірювання ваги вагонетки, вологості і температури повітря в камерах №1, №2 та №3. За результатами вимірювань розраховується швидкість і час сушки. Відповідно до розрахункових даних видається керуючий сигнал на частотні перетворювачі, керуючі швидкістю обертання вентиляторів циркуляції, витяжного вентилятора і теплогенератора. Ступінь відкриття заслінок гарячого і нагрітого повітря встановлюється шляхом подачі керуючого сигналу на реверсивні пускачі і контролюється сигналом від датчика положення. Після закінчення тимчасового інтервалу, що визначається постійною часу сушіння, проводиться порівняння розрахункового часу сушки з часом перебування вагонетки в сушильній камері.

Якщо сушка тривала менше розрахункового часу, проводиться вимірювання ваги вагонетки, вологості і температури повітря в камерах №1, №2 та №3. За результатами вимірювань проводиться розрахунок фактичної швидкості сушіння, який порівнюється із заданим значенням. За величиною відхилення фактичної швидкості сушіння від заданої, приймається одне з таких рішень:

- при різниці менше 5% - змінити швидкість обертання вентиляторів циркуляції повітря;
- при різниці більше 5% але менше 10% - змінити ступінь відкриття заслінок гарячого і нагрітого повітря;
- при різниці більше 10% - змінити швидкість обертання витяжного вентилятора і теплогенератора.

Продовжувати процес сушіння до закінчення тимчасового інтервалу, що визначається постійною часу сушіння. Після закінчення тимчасового інтервалу знову проводиться порівняння розрахункового часу сушки з часом перебування вагонетки в сушильній камері. Таким чином, процес буде циклічно повторюватись, поки час сушіння не досягне розрахункового. Алгоритм показано в Додатку А (рис. А.3).

Режим «Розвантаження» використовується, якщо необхідно зупинити роботу сушильної камери або звільнити камери від вагонеток при роботі в режимі «Завантаження». Спочатку подається команда на відкривання дверей. Потім перевіряється наявність вагонеток в камерах №1, №2 та №3. При відсутності вагонеток - режим «Розвантаження» завершується. Якщо хоча б одна

вагонетка в камерах №1, №2 та №3 буде виявлена - проводиться перевірка на наявність вагонетки в зоні вивантаження. Якщо вагонетка в зоні вивантаження виявлена - оператору видається застережливий сигнал «Зона вивантаження зайнята» і триває перевірка доти, поки зона вивантаження НЕ буде вільна. Коли зона вивантаження буде вільна - включиться електролафети і перемістять вагонетки на 1 позицію. Знову перевіряється наявність вагонеток в камерах №1, №2 та №3 і процес триває до тих пір, поки всі вагонетки не будуть видалені. Алгоритм надано в Додатку А (рис. А.4).

## 4 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

### 4.1 Обґрунтування вибору для досліджень стадії сушіння технологічного процесу виготовлення керамічної цегли

Стадія сушіння цегли-сирцю в технологічному процесі виготовлення керамічної цегли є однією з визначальних з наступних причин [1, 4, 7]:

- ✓ наявність значних енергетичних витрат, які становлять до 30% собівартості продукції, що випускається;
- ✓ велика тривалість процесу сушіння (до 90% загального часу технологічного циклу, що становить за різними даними від 18 до 82 годин), що створює певні складнощі при синхронізації різних етапів технологічного процесу;
- ✓ суттєвий вплив на якість продукції нестабільності ведення процесу сушіння в сушильних камерах (до 30% браку). Великий відсоток браку при сушінні цегли-сирцю пов'язаний, перш за все, з нерівномірністю прогріву вологої сировини (цегли-сирцю) і, як наслідок, з нерівномірним видаленням вологи, що призводить до появи неприпустимої термічної напруги та розтріскування.

Слід також зазначити, що стабільність технологічного процесу сушіння керамічної цегли-сирцю залежить від кліматичних умов (добова та сезонна зміна температури та вологості), а також умов попередньої підготовки та фізико-хімічних характеристик сировини [5]. Це означає, що на практиці технологічний процес ведеться в широкому діапазоні зміни вхідних змінних, що збурюють, при необхідності суворого дотримання технологічного регламенту процесу сушіння.

З урахуванням наведеного вище, завдання створення енергоефективної системи управління технологічним процесом сушіння цегли-сирцю, що забезпечує як підвищення ефективності процесу висушування, так і створення умов для зменшення кількості браку на цій стадії виробництва, є наразі актуальним.

Вирішення поставленого завдання передбачає виконання наступних кроків:

- виконання аналізу технологічного процесу сушіння цегли-сирцю в камерній сушарці періодичної дії як об'єкта управління;
- розробка аналітичним способом адекватної математичної моделі технологічного процесу сушіння цегли-сирцю в камерній сушарці періодичної дії, придатної для використання її в процесі створення системи управління;

- виконання ідентифікації параметрів отриманої аналітичним способом математичної моделі об'єкта управління на основі експериментальних даних або літературних джерел;
- аналіз та дослідження математичної моделі технологічного процесу сушіння цегли-сирцю в камерній сушарці періодичної дії з метою з'ясування найважливіших особливостей та характеристик об'єкта управління, що впливають на вибір мети та способу управління;
- розробка алгоритму та структури оптимальної системи управління технологічним процесом сушіння цегли-сирцю в камерній сушарці періодичної дії.

#### **4.2 Конструктивно-технологічний аналіз об'єкта управління – камерної сушарки періодичної дії**

На цегельних заводах невеликої продуктивності (до 10 млн. шт. ум. цегли на рік) на стадії сушіння цегли-сирцю застосовуються переважно камерні сушарки періодичної дії [7, 8], включені паралельно, ефективність яких в основному визначається режимом термічної обробки цегли-сирцю (технологічним регламентом), встановленим для конкретного виду продукції.

Керамічні цеглини, виготовлені пластичним методом, містять певну кількість механічно пов'язаної вологи (до 25-30% вологовмісту), яку необхідно видалити для надання цеглі-сирцю необхідної механічної міцності перед подачею на стадію випалу. Сушіння цегли-сирцю виконують тільки з використанням конвективних потоків теплоносія, тобто методом, при якому надлишкова волога випаровується в результаті прямого теплового контакту матеріалу, що висушується з теплоносієм, в якості якого найчастіше використовують атмосферне повітря, змішане з нагрітими топковими газами зі стадії випалу.

Об'єкт управління – камерна сушильна установка (камерна сушарка) – складається з блоку однотипних сушильних камер, які працюють у технологічному процесі паралельно (див. рис. 4.1). Як правило, всі ці камери мають однакову конструкцію та ідентичні конструктивні характеристики, а отже, однакові динамічні властивості. Разом з тим, кожна окрема сушильна камера може працювати в індивідуальному режимі, який залежить від низки зовнішніх факторів (обсяг сировини та її основні характеристики, визначені при надходженні на сушіння, кліматичні фактори та ін.).

Вихідна сировина (будемо називати її – матеріал) для сушіння – цегла-сирець (1), укладена на вагонетку (2) пошарово і таким чином, щоб забезпечити вільне обтікання теплоносієм кожної окремої цеглини, завантажуються через вхідні двері (4) у камерну сушарку. Перед завантаженням матеріалу в сушарку проводиться лабораторний контроль його вологості. У сушильній камері



вагонетка з сировиною часто встановлюється на спеціальні ваги для контролю зміни маси завантаженої сировини в процесі сушіння.

Теплоносієм для виконання процесу сушіння служить гаряче повітря, потік якого формується шляхом змішування топкових газів, що надходять по повітропроводу (7) через заслінку (3) з атмосферним повітрям, яке подається з повітропроводу (8) через заслінку (3) за допомогою вентилятора. Необхідна кількість та температура теплоносія регулюється заслінками (3) шляхом зміни співвідношення потоків гарячого топкового газу та холодного повітря. Температура теплоносія, при якій відбувається процес сушіння цегли-сирцю становить від 50<sup>0</sup>С до 80<sup>0</sup>С. Для забезпечення ефективного та рівномірного теплообміну всередині камери швидкість потоку теплоносія повинна бути не менше 2-3 м/сек, що забезпечує необхідну турбулентність у процесі теплообміну.

Відпрацьований теплоносій з кінцевою температурою 40<sup>0</sup>С - 60<sup>0</sup>С відводиться в атмосферу, або в деяких випадках частково повертається для змішування з холодним повітрям для забезпечення більш ефективного використання тепла (як правило в тих випадках, коли теплоносій для стадії сушіння приготується окремо).

Після завершення циклу сушіння цегла-сирець, що зменшується в розмірах на 5 – 10%, повинна мати кінцеву вологість (вологівміст) згідно з регламентом на рівні 4 - 6%. Оперативний контроль кінцевої вологості виконати дуже складно, тому момент вивантаження матеріалу з сушильної камери визначається або спираючись на досвід, або за показаннями ваг (6). Висушений матеріал через двері (5) вивантажується з сушарки та направляється в обпалювальну піч.

Для попередження передчасного або надмірного висихання поверхні цегли-сирця (утворення крихкої скоринки) її висушують в помірно-нагрітому та зволоженому теплоносії. В цьому випадку волога випарюється зі всієї товщі матеріалу більш рівномірно і зменшується ризик розтріскування.

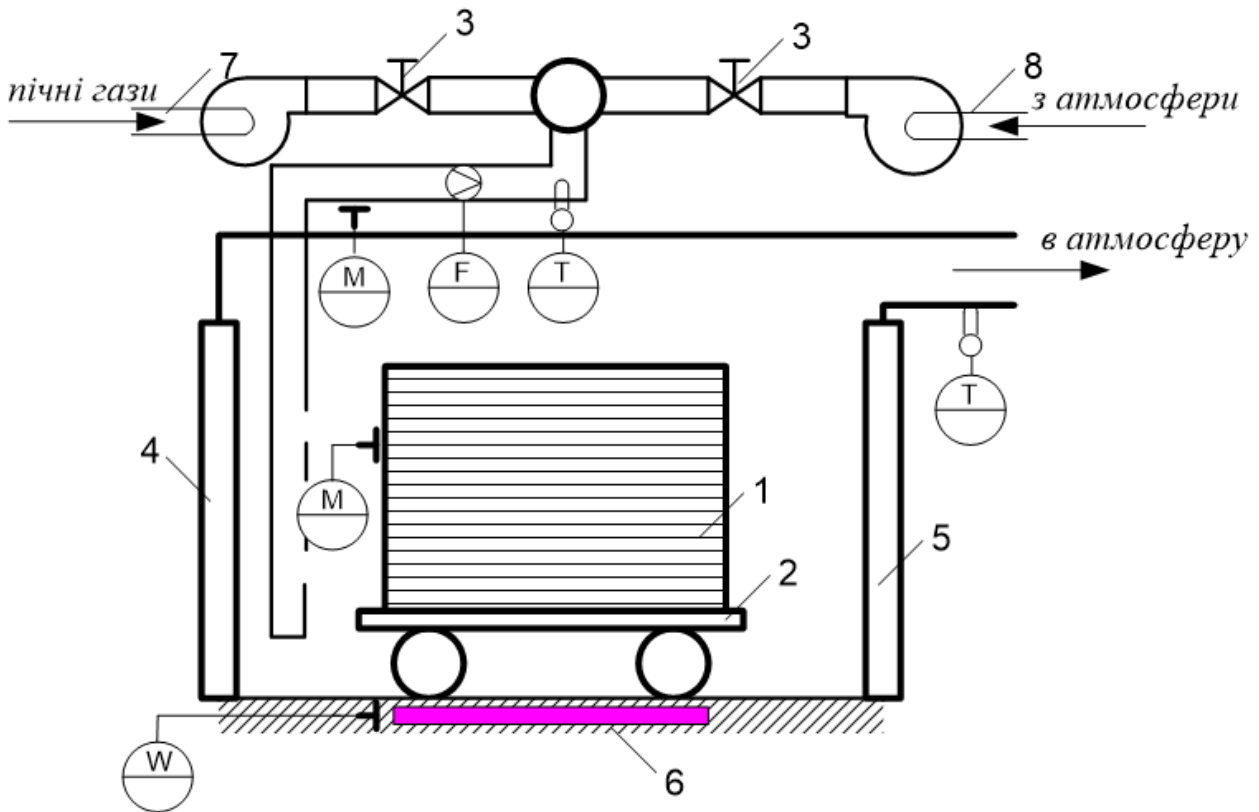


Рис. 4.1 - Технологічна схема окремої камери для сушіння цегли-сирцю:

1 - сировина для сушіння; 2 - тара для сировини; 3 - вентиль для регулювання витрати газу; 4, 5 - двері для завантаження та вивантаження сировини; 6 - ваги для зважування сировини; 7 - повітропровід для пiчних газів; 8 - повітропровід для атмосферного повітря

Технологічний процес сушіння цегли-сирцю відповідно до регламенту ділиться на три стадії:

- стадія попереднього нагріву матеріалу, коли тепло, що підводиться, витрачається переважно на підігрів від початкової температури (яка залежить від зовнішніх кліматичних умов) до температури активного висушування;
- стадія постійної швидкості сушіння;
- стадія швидкості сушіння, що зменшується.

Кінетика процесу сушіння буде розглянута нижче (див. п. 4.3)

Аналіз технологічного процесу попереднього висушування цегли-сирцю дозволив визначитись з переліком та характеристиками вхідних (таких що керують та збурюють) та вихідних змінних, які представлені в таблицях 4.1.- 4.3.

Таблиця 4.1 – Характеристики вхідних змінних, що керують

№	Найменування змінної	Позначення	Од. виміру	Діапазон значень	Примітка
1	Температура теплоносія на вході до сушарки	$T_{rov}^0$	$^0C$	60 – 90 $^0C$	
2	Об'ємна витрата теплоносія на вході до сушарки	$G_{rov}^0$	м <sup>2</sup> /час	Визначається потужністю	
3	Кількість цеглин в завантаженні камери	$N_c$	шт.	Визначається потужністю	

Таблиця 4.2 – Характеристики вхідних змінних, що збурюють

№	Найменування змінної	Познач.	Од. виміру	Діапазон значень	Примітка
1	Відносна вологість теплоносія	$\varphi$	%	Визначається кліматичними умовами	
2	Атмосферний тиск	$P_{atm}$	Па		
3	Температура матеріалу при завантаженні	$T_{mat0}$	$^0C$		
4	Вологість матеріалу при завантаженні	$u_{mat0}$	кг/кг с.м.	0,20 – 0,30	
5	Вологовміст теплоносія на вході в сушарку	$u_{rov}^0$	кг/кг с.п.	Не регламентується	

Таблиця 4.3 – Характеристики вихідних змінних

	Найменування змінної	Познач.	Од. вим.	Діапазон значень	Примітка
	Температура теплоносія на виході до сушарки	$T_{rov}$	$^0C$	30 – 60 $^0C$	
	Температура матеріалу в процесі сушіння	$T_{mat}$	$^0C$		Не контролюється
	Вологовміст теплоносія на виході з сушарки	$u_{rov}$	кг/кг с.п.		Не контролюється
	Вологість матеріалу в процесі сушіння	$u_{mat}$	кг/кг с.м.	0,04 – 0,06	Не контролюється
	Час сушіння	$\tau_{end}$	год		

Структурна схема об'єкта управління з урахуванням поданого вище переліку вхідних (таких що керують та збурюють) та вихідних змінних зображена на рис. 4.2.

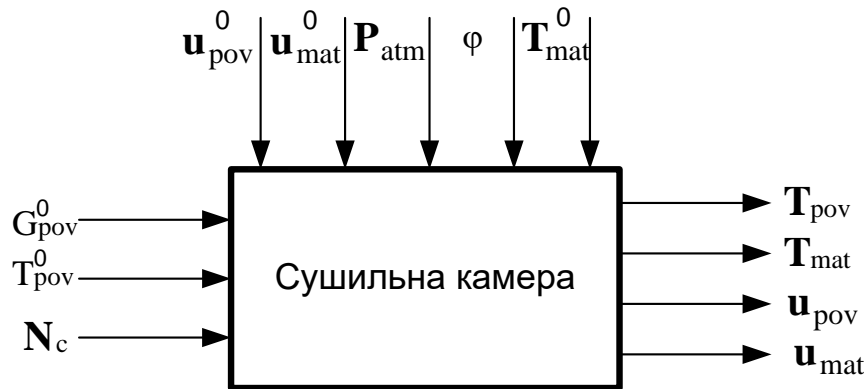


Рис. 4.2 - Структурна схема об'єкта управління - сушильної камери

### 4.3 Аналіз механізму процесу сушки матеріалів

Сушка – це фізичне явище видалення вологи з твердих зволжених (не сухих) матеріалів завдяки її випаруванню в процесі підводу до матеріалу, що висушується, тепла та одночасного відводу виникаючої пари [2, 10]. Сушка вологих матеріалів являє собою сукупність процесів переносу тепла та маси, які в деяких випадках супроводжуються хімічними явищами, або структурно-механічними змінами матеріалу, що висушується.

Як бачимо, сушка – процес, насамперед, тепло- та масообмінний. Видалення вологи з поверхні матеріалу пов'язане з переміщенням (підведенням) її з внутрішніх областей матеріалу до поверхневих шарів. Сушка матеріалів кардинально відрізняється від випарювання тим, що при висушуванні видалення вологи проходить при будь-якій температурі (до прикладу – процес сублімації), а випарювання можливе лише при рівності тиску пару, що створюється, тиску зовнішнього середовища (наприклад, вода кипить при тиску, що дорівнює барометричному). Випарювання проходить у всій масі матеріалу, а при сушці волога видаляється тільки з поверхні матеріалу. І хоча випарювання більш інтенсивний процес, чим сушка, але не всі матеріали його допускають. Зокрема, для твердих матеріалів допускається виключно висушування.

Властивість матеріалу накопичувати та утримувати в собі вологу визначається величиною енергії, що необхідно надати вологі в матеріалі, яка дозволила б відірвати її від матеріалу. Розрізняють такі види зв'язку (в порядку зменшення енергії):

- хімічно пов'язана волога;
- адсорбційний зв'язок;

- капілярний зв'язок;
- фізико-механічний зв'язок;
- осмотичний зв'язок.

Для твердих матеріалів на кшталт керамічної цегли характерним і визначальним є фізико-механічний зв'язок матеріалу з вологою, яка вільно утримується в макрокапілярах і може бути відносно просто видалена.

Для вологи, що знаходиться в матеріалі, є характерним відповідний тиск водяної пари  $P_{mat}$ , що залежить від вологості матеріалу, температури і характеру зв'язку її з матеріалом. Зі зростанням температури матеріалу тиск  $P_{mat}$  також зростає.

Чим сильніший зв'язок вологи з матеріалом, тим менше тиск  $P_{mat}$ . Для вільної вологи  $P_{mat} = P_n$ , де  $P_n$  - тиск насиченої пари над вільною поверхнею матеріалу.

Поza межами матеріалу, що висушується, знаходиться зазвичай суміш водяної пари з парціальним тиском  $P_n$  та повітря. Якщо парціальний тиск пари в матеріалі  $P_{mat}$  відрізняється від парціального тиску пари в навколишньому середовищі  $P_n$ , а саме  $P_{mat} > P_n$ , то виникає рушійна сила, яка призводить до виникнення процесу масообміну, який буде наявним аж до встановлення рівноваги, коли  $P_{mat} = P_n$ .

В залежності від способу підведення тепла до матеріалу, що висушується, розрізняють наступні види сушіння:

- конвективна;
- контактна;
- радіаційна;
- діелектрична;
- сублімаційна.

Для твердих матеріалів найбільшого розповсюдження набуло конвективне сушіння в результаті безпосереднього контакту матеріалу з теплоносієм (нагрітим повітрям, або топковими газами). Потік теплоносія передає матеріалові тепло для висушування вологи і одночасно забирає з собою виникаючу в результаті випаровування надлишкову пару, тобто виступає одночасно в ролі тепло- та вологоносія.

Розглянемо особливості та основні закономірності конвективного сушіння вологого, інертного, нерозчинного капілярно-пористого матеріалу, яким є керамічна цегла [ 2 ], в найбільш простому випадку, коли теплоносій (нагріте повітря) має незмінні параметри (температуру  $T_{rov}^0$ , відносну вологість  $\varphi$  та швидкість руху повітря), а матеріал, що висушується, являє собою тонкі пластини з великою поверхнею теплообміну. Це дозволяє вважати, що вологість в середині матеріалу буде мати відносно рівномірний розподіл.

Якщо режим сушіння «м'який» (тобто невелика температура теплоносія при відносно значній вологості, що відповідає умовам ведення процесу, що наразі розглядається), то процес видалення вологи з матеріалу йде наступним чином [2, 9].

Волога зі всього об'єму матеріалу переміщується в граничні ділянки за рахунок дифузії та конвекції, при чому потоки тепла й маси йдуть назустріч один одному. Волога може переміщуватись в матеріалі в вигляді рідини (випаровування йде на поверхні), або в вигляді пари (випаровування йде в середині капілярів). Як рідина, так і пара можуть рухатись під дією, як молекулярної дифузії, так і від наявності градієнта тиску.

На рис. 4.3 наведені типові кінетичні криві, що дають уявлення про механізм процесу

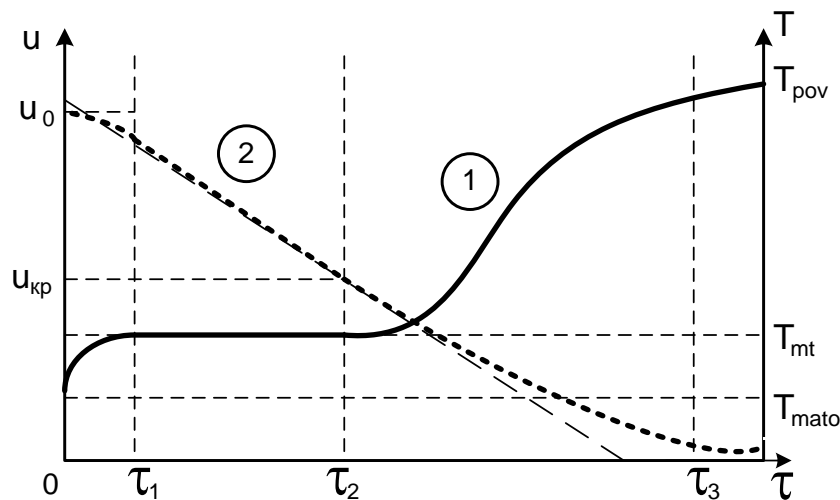


Рис. 4.3 - До пояснення кінетики механізму сушіння:  
1 - крива нагрівання матеріалу; 2 - крива зміни вологості матеріалу

сушіння. Можна побачити, що існує три етапи (стадії, періоди) сушіння. На першому етапі (від початку процесу до часу  $\tau_1$ ) матеріал нагрівається від початкової температури  $T_{mato}$  до температури «мокрого термометра»  $T_{mt}$ , а його вологість зменшується відносно мало. З моменту  $\tau_1$  починається другий етап – етап постійної швидкості сушіння, залежний лише від інтенсивності підводу тепла (тобто різниці температур теплоносія і поверхні матеріалу). На цьому етапі волога активно видаляється з поверхні матеріалу і з мікропор, з яких вона переміщується до поверхні. Газова фаза поблизу поверхні стає насиченою водяною паром, в результаті чого температура

поверхні остається в процесі сушіння практично незмінною і такою, що дорівнює температурі «мокрого термометра» для параметрів газової фази, а волога видаляється з максимально можливою швидкістю рівномірно, пропорційно часу сушіння. В кінці цього етапу досягається критична вологість матеріалу  $u_{mat}^*$ , яка відповідає вологості в гігроскопічній точці.

З моменту  $\tau_2$  процес сушіння переходить в область гігроскопічного стану мокрого матеріалу з поступовим зменшенням швидкості аж до моменту досягнення рівноважної вологості  $\tau_3$ , коли процес сушіння фактично закінчується. В цей період (від  $\tau_2$  до  $\tau_3$ ) температура матеріалу зростає і досягає значення, близького до температури теплоносія  $T_{rov}$ , а швидкість видалення вологи зменшується і стає залежною від фізико-хімічних властивостей та структури матеріалу. Фронт випаровування при цьому зміщується в глибину матеріалу.

#### **4.4 Розроблення математичної моделі процесу сушіння матеріалу в камерній сушці періодичної дії аналітичним методом**

##### 4.4.1 Аналіз проблеми

Традиційно технологічний процес сушіння цегли-сирцю розглядається як суперпозиція трьох фізичних процесів [3, 4, 6, 9]: конвективної дифузії, дифузії в капілярах та десорбції вологи, які, діючи одночасно, визначають розвиток теплових, масообмінних та гідродинамічних явищ. В результаті математична модель технологічного процесу висушування в ідеальному варіанті опирається на сумісне використання рівнянь теплопередачі, закону Фіка і співвідношень, що описують гідродинаміку процесів в капілярній системі матеріалу, що сушиться.

Загальна задача створення моделі процесу масопереносу в термодинамічних умовах сушіння складається з двох складових:

- ✓ опис періоду сушіння з постійною швидкістю, коли випарування вологи можна вважати близьким до адіабатного, а волога знаходиться тільки на поверхні матеріалу, що сушиться, і в вільному стані. Випарування вологи при цьому проходить при її контакті з теплоносієм в конвективному потоці;
- ✓ опис періоду сушіння зі зниженою швидкістю, коли через зменшення кількості вологи в матеріалі фронт випарування переміщується з поверхні в глибину.

Маючи на увазі вказаний підхід, математична модель процесу висушування для окремої цеглини (див. рис. 4.4) буде являти собою систему диференціальних рівнянь тепло- та масопереносу в часткових похідних, що описує зміну в динаміці і в просторі температури  $T$  та вологості  $u$  [9,11]

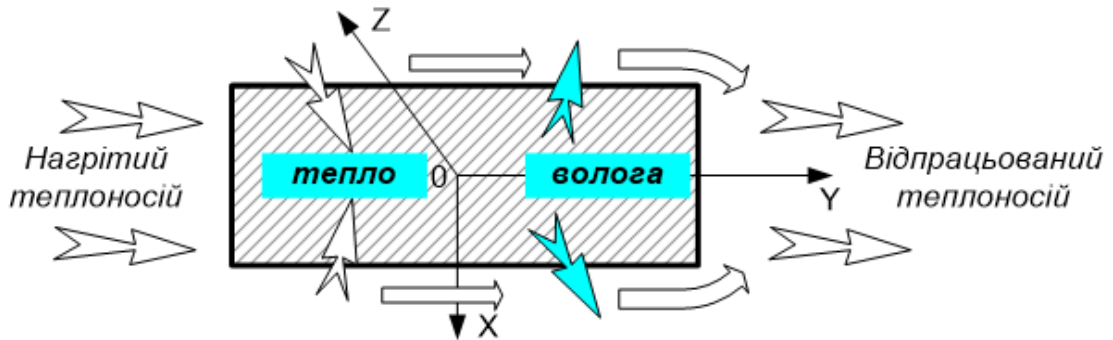


Рис. 4.4 - Схема процесу висушування для окремої цеглини

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = D\nabla^2 u + D\delta_m \nabla T, \\ \frac{\partial T}{\partial t} = a\nabla^2 T + \frac{\varepsilon r}{c} \frac{\partial u}{\partial t}, \end{cases} \quad (4-1)$$

де  $\nabla$  - оператор Лапласа;  $a$  – коефіцієнт температуропровідності,  $\frac{m^2}{c}$ ;  $D$  – коефіцієнт молекулярної дифузії,  $\frac{m^2}{c}$ ;  $\delta_m$  – термоградієнтний коефіцієнт;  $\varepsilon$  – коефіцієнт фазового перетворення;  $r$  – питома теплота пароутворення,  $\frac{kJ}{kg}$ ;  $c$  – масова теплоємність,  $\frac{kJ}{kg \cdot K}$ .

Для забезпечення виконання умови єдиності рішення рівняння системи (4-1) необхідно доповнити початковими та граничними умовами, що являє собою окрему, не просту задачу.

З точки зору рішення задачі управління математична модель процесу сушіння (4-1) має ряд суттєвих недоліків, серед яких:

- неможливість отримання аналітичного рішення системи (4-1);
- висока складність чисельного розв'язку системи (4-1), яка для цього повинна бути представлена в кінцево-різницевому вигляді;
- суттєві труднощі коректного завдання граничних умов в тому випадку, якщо мова йде не про окрему цеглину, а про масове виробництво;
- відсутність для параметрів моделі (4-1) достовірних значень в літературних джерелах и принципова складність отримання їх експериментальним шляхом;
- залежність параметрів моделі (4-1) (теплопровідність, теплоємність та інші) від умов проведення процесу сушіння, зокрема від температури та вологовмісту (вологості);
- складність отримання з диференціальних рівнянь в часткових похідних передаточних функцій, які широко використовуються при синтезі законів управління.



Все це потребує прийняття такого підходу до розробки математичної моделі технологічного процесу сушіння цегли-сирцю в камерній сушарці періодичної дії, який забезпечує вирішення поставленої в роботі задачі створення енергоефективної системи управління за обмежених можливостей та з прийнятною точністю.

#### 4.4.2 Обґрунтування та прийняття припущень, що спрощують, та ідеалізація режимів.

Базуючись на аналізі особливостей механізму процесу сушіння (див. п.4.4.2) та маючи на увазі цілі побудови математичної моделі технологічного процесу сушіння цегли-сирцю в камерній сушарці періодичної дії, нами були прийняті наступні припущення, що спрощують процес розробки моделі, адекватної об'єкту, що моделюється, а саме:

1. З урахуванням рівномірної подачі теплоносія в сушарку у всьому поперечному розрізі сушильної камери, що може бути досить просто реалізовано завдяки відповідній конструкції повітропроводів, та маючи на увазі спеціальну укладку цегли-сирця на піддоні вагонетки, яка забезпечує вільний доступ теплоносія до матеріалу у всьому об'ємі та створення турбулентності потоків, приймаємо, що гідродинамічний режим потоку теплоносія в сушарці близький до режиму ідеального перемішування.
2. Враховуючи нещільну укладку цегли-сирцю в садок (штабель для завантаження в камеру), можна припустити, що кожна окрема цеглина в штабелі знаходиться в ідентичних теплових та гідродинамічних умовах і, отже, весь садок можна розглядати в вигляді суцільної маси з рівномірним усередненим одночасним прогрівом її у всьому об'ємі.
3. Теплові втрати в навколишнє середовище при сушінні в камерній сушарці не перевищують 8-10% від загального теплового балансу [ 7 ] і змінюються на протязі одного циклу сушіння незначно, а тому будемо вважати теплові втрати постійними і враховувати їх в моделі в вигляді коефіцієнта.
4. Так як в процесі циклу сушіння в умовах якісного управління температурний режим знаходиться близько до регламентних норм, а максимальний діапазон температур не перевищує 30 °С, залежністю таких параметрів технологічного процесу, як теплоємність, щільність, коефіцієнт тепловіддачі, та інше, від температури нехтуємо, розглядаючи їх величинами константними і усередненими.
5. З урахуванням розглянутого вище (див. п. 4.3) сучасного уявлення про трьох стадійний механізм процесу сушіння і вважаючи, що на першій та третій стадіях (етапах) кількість випаруваної вологи складає незначну частку від загальної маси вологи (з таких причин: для першого етапу це малий інтервал часу та низка температура матеріалу, а для третього

етапу – низька вологість матеріалу та більша сила зв'язку вологи з матеріалом), приймаємо припущення, що активна фаза сушіння сконцентрована на другому етапі.

#### 4.4.3 Формування рівнянь математичної моделі.

Аналітичний метод побудови математичної моделі передбачає детальне вивчення та глибоке розуміння фізико-хімічних закономірностей, що протікають в об'єкті моделювання [ 12 ]. В результаті до складу математичного опису включаються залежності, що пов'язують між собою змінні та параметри об'єкта, який вивчається, які і складають єдину систему рівнянь математичної моделі. При цьому використовуються залежності, що відображають фундаментальні закони збереження речовини та енергії (матеріальний та тепловий баланси), а також інші співвідношення, що описують фізичні чи хімічні явища в об'єкті моделювання.

Так як будь-який об'єкт моделювання має матеріальну основу, то система рівнянь математичного опису в своєму складі завжди має рівняння матеріального балансу (загального або за конкретною речовиною), а рівняння теплового балансу використовуються лише в тому випадку, коли теплові явища в об'єкті відіграють суттєву роль.

Виконаний аналіз процесу сушіння в камерній сушарці періодичної дії показав, що теплові явища тут відіграють провідну роль, а значить в складі математичної моделі повинні бути присутніми рівняння як матеріального, так і теплового балансу. Разом з тим слід відмітити, що на протязі циклу сушіння цегли-сирця кількість сухої маси (глини) і сухого повітря не міняється (фактично вони є лише носіями тепла та вологи) і тому формування рівнянь матеріального балансу відносно сухої маси цегли та сухого повітря не є необхідним.

##### 4.4.3.1 Тепловий баланс об'єкта управління відносно теплоносія

Складемо тепловий баланс об'єкта управління – камерної сушарки цегли-сирцю, схема теплових потоків якої представлена на рис. 4.5, з урахуванням прийнятих вище ідеалізацій та спрощень.

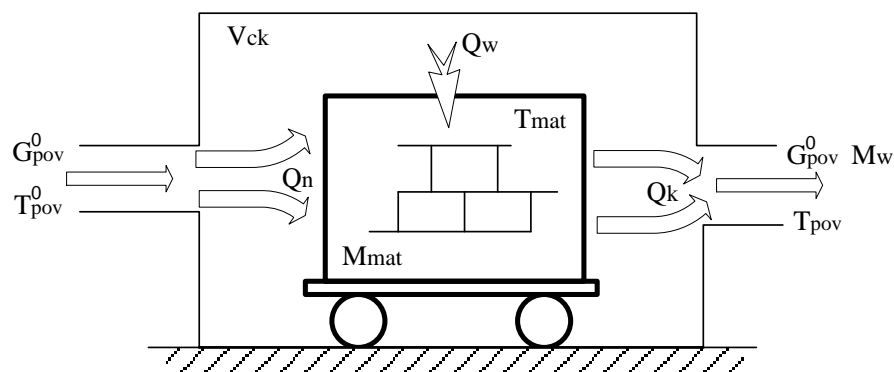


Рис. 4.5 - Схема теплових потоків об'єкта управління

Тепловий баланс об'єкта управління відносно теплоносія в загальному вигляді [ 12 ]

$$\Delta Q = Q_n - Q_k - Q_w, \quad (4-2)$$

де  $\Delta Q$  – швидкість накопичення (збільшення чи зменшення) ентальпії теплоносія в межах об'єму камерної сушарки може бути визначене через швидкість зміни температури теплоносія в сушарці  $T_{rov}$  як

$$\Delta Q = V_{ck} \cdot \rho_{rov} \cdot c_{p_{rov}} \cdot \frac{dT_{rov}}{dt}, \quad (4-3)$$

де  $V_{ck}$  – об'єм камерної сушарки, м<sup>3</sup>;  $\rho_{rov} = 1.2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ,  $c_{p_{rov}} = 1005 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$  - щільність та питома ізобарна теплоємність теплоносія відповідно;

$Q_n$  – кількість теплоти, що надходить в камерну сушарку з вхідним потоком теплоносія визначається з виразу

$$Q_n = G_{rov}^0 \cdot \rho_{rov} \cdot c_{p_{rov}} \cdot T_{rov}^0, \quad (4-4)$$

де  $G_{rov}^0$  – об'ємна витрата теплоносія, що гріє,  $\frac{\text{м}^3}{\text{год}}$ , з параметрами  $\rho_{rov}$ ,  $c_{p_{rov}}$  на вході в сушарку;  $T_{rov}^0$  - температура теплоносія на вході в сушарку;

$Q_k$  - кількість теплоти, що виходить з камерної сушарки з вихідним потоком теплоносія, що складається з масових потоків повітря  $G_{rov}^0 \cdot \rho_{rov}$  та пари  $M_{ww}$ , яка виникає в процесі висушування матеріалу, визначається з виразу

$$Q_k = (1 + \beta_{pt}) \cdot (G_{rov}^0 \cdot \rho_{rov} + M_{ww}) \cdot c_{p_{rov}} \cdot T_{rov}, \quad (4-5)$$

де  $\beta_{pt}$  – коефіцієнт втрат тепла через зовнішню стінку сушарки, який за літературними джерелами [ 7 ] може бути прийнятим на рівні 6-10% від загальної кількості тепла на виході з камерної сушарки.

$Q_w$  – кількість теплоти, яка затрачується на процес висушування матеріалу конвективним способом, визначається за формулою Ньютона

$$Q_w = \alpha \cdot F_{mat} \cdot (T_{rov} - T_{mat}), \quad (4-6)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі від теплоносія до поверхні матеріалу, що має орієнтовне значення за літературним джерелом [27]  $\alpha \approx 12 \div 16 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} = 43000 \div 58000 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{год}}$ ;

$F_{mat}$  - повна поверхня теплопередачі матеріалу, який висушується, м<sup>2</sup>, яка в випадку цегли визначається як сумарна поверхня завантаженої на висушування цегли-сирця, а саме

$$F_{mat} = k_f \cdot f_{mat} \cdot N_c, \quad (4-7)$$

де  $N_c$  – кількість цеглин в загрузці, шт.;  $f_{mat}$  – площа поверхні теплообміну цеглини, м<sup>2</sup>, (для одинарної стандартної керамічної цеглини  $f_{mat}=0,106$  м<sup>2</sup>);  $k_f$  – коригуючий коефіцієнт, що враховує площу перекриття цеглин при укладці в садку, близький до одиниці.

Підставивши рівняння (4-3) - (4-7) в (4-2), отримаємо рівняння теплового балансу відносно теплоносія

$$\begin{aligned} V_{ck} \cdot \rho_{pov} \cdot c_{p\_pov} \cdot \frac{dT_{pov}}{dt} = G_{pov}^0 \cdot \rho_{pov} \cdot c_{p\_pov} \cdot T_{pov}^0 - \\ -(1 + \beta_{pt}) \cdot (G_{pov}^0 \cdot \rho_{pov} + M_{ww}) \cdot c_{p\_pov} \cdot T_{pov} - \\ - \alpha \cdot k_f \cdot f_{mat} \cdot N_c \cdot (T_{pov} - T_{mat}). \end{aligned} \quad (4-8)$$

Після нескладних перетворень та підстановки відомих коефіцієнтів остаточно

$$\frac{dT_{pov}}{dt} = \frac{G_{pov}^0 \cdot T_{pov}^0}{V_{ck}} - \frac{(1 + \beta_{pt}) \cdot (G_{pov}^0 \cdot \rho_{pov} + M_{ww}) \cdot T_{pov}}{V_{ck} \cdot \rho_{pov}} - \frac{0,106 \cdot \alpha \cdot k_f \cdot N_c \cdot (T_{pov} - T_{mat})}{V_{ck} \cdot \rho_{pov} \cdot c_{p\_pov}}. \quad (4-9)$$

Початкові умови для цього диференційного рівняння  $T_{pov}(0) = T_{pov0}$ .

#### 4.4.3.2 Тепловий баланс об'єкта управління відносно матеріалу, що висушується

Рівняння теплового балансу об'єкта управління відносно матеріалу, що нагрівається та сушиться в камерній сушарці періодичної дії, в загальному вигляді (див. рис. 4.5)

$$\Delta Q_m = Q_{mn} - Q_{mk} - Q_w, \quad (4-10)$$

де  $\Delta Q_m$  – швидкість накопичення (збільшення чи зменшення) ентальпії матеріалу, що висушується в камерній сушарці, може бути визначене через швидкість зміни температури матеріалу  $T_{mat}$  як

$$\Delta Q_m = M_{mat} \cdot c_{p\_mat} \cdot \frac{dT_{mat}}{dt}, \quad (4-11)$$

де  $M_{mat}$  – маса сирого матеріалу (цегли-сирцю), завантаженого в камерну сушарку, кг, може бути визначена через масу однієї цеглини  $m_{c\_c}=3.5$  кг в сухому стані, завантаженою кількість цеглин  $N_c$  та змінну вологість цегли  $u_{mat}$ , як

$$M_{mat} = (u_{mat} + 1) \cdot m_{c\_c} \cdot N_c; \quad (4-12)$$

$c_{p\_mat} = 750 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$  – усереднена питома ізобарна теплоємність матеріалу (в першому наближенні).

Маючи на увазі ідеалізацію процесу сушки та різні її механізми в залежності від конкретних умов (див. розділ 4.3) допускаємо, що в теплових процесах сушки матеріалу безпосередньо матеріал (цегла-сирець) може розглядатись як своєрідний «транспорт» для здійснення випарювання і тому різниця між надходженням тепла при завантаженні матеріалу на сушку  $Q_{mn}$  та виведенням тепла з матеріалом при вивантаженні  $Q_{mk}$  після завершення процесу сушки або дорівнює нулю, або незначна порівняно з загальною кількістю тепла, необхідною для сушки (за орієнтовними підрахунками близько 10%), тобто приймаємо

$$Q_{mn} - Q_{mk} = 0. \quad (4-13)$$

В процесі висушування матеріалу, як згадувалось вище (див. розд. 4.3), швидкість конвективного теплообміну між теплоносієм та матеріалом на різних етапах сушки різна. На першому та третьому етапах вона визначається різницею температур теплоносія  $T_{rov}$  та поверхні матеріалу (при припущенні, що матеріал прогривається рівномірно)  $T_{mat}$ , а на другому етапі (безпосередньо сушка, яка йде при постійній температурі поверхні матеріалу, що дорівнює температурі «мокрого термометра»  $T_{mt}$  для термодинамічних умов теплоносія) є постійною.

Умовою завершення першого етапу сушки (прогрівання матеріалу від початкової температури  $T_{mato}$  до температури «мокрого термометра»  $T_{mt}$ ) буде порушення нерівності  $T_{mat} < T_{mt}$  (в випадку, якщо початкова температура матеріалу, що сушиться, буде менша, чим температура «мокрого термометра», що як правило виконується).

Умовою завершення другого етапу сушки (безпосередньо процес випарювання) буде виконання одночасно двох умов  $T_{mat} = T_{mt}$  та  $u_{mat} \geq u_{mat}^*$ , де  $u_{mat}^*$  - критична вологість матеріалу.

І нарешті третій етап здійснюється при одночасному виконанні інших двох умов  $T_{mat} > T_{mt}$  та  $T_{mat} < T_{rov}$ .

Таким чином для визначення  $Q_w$  - кількості теплоти, яка затрачується на процес висушування матеріалу, використаємо формули (4-6) та (4-7) з урахуванням розглянутих вище умов. Маємо

$$Q_w = \begin{cases} \alpha \cdot F_{mat} \cdot (T_{rov} - T_{mat}) & \text{при } T_{mat} < T_{mt}; \\ 0, & \text{при } T_{mat} = T_{mt} \text{ та } u_{mat} \geq u_{mat}^*; \\ \alpha \cdot F_{mat} \cdot (T_{rov} - T_{mat}) & \text{при } T_{mat} > T_{mt} \text{ та } T_{mat} < T_{rov}. \end{cases} \quad (4-14)$$

Тут  $u_{mat}$  – вологість матеріалу, що висушується,  $\frac{\text{кг}}{\text{кг с.м.}}$ ;  $u_{mat}^*$  – рівноважна (критична) вологість матеріалу, після якої швидкість видалення вологи з матеріалу стає значно меншою (з літературних джерел [ 7 ] вважається, що  $u_{mat}^* \leq 0,05$ ).

Таким чином, рівняння теплового балансу об'єкта управління відносно матеріалу, що нагрівається та сушиться в камерній сушарці періодичної дії, з урахуванням (4-6), (4-10) та (4-13)

$$(u_{mat} + 1)m_{c,c}N_c c_{pmat} \frac{dT_{mat}}{dt} = \begin{cases} \alpha \cdot k_f f_{mat} N_c (T_{pov} - T_{mat}) & \text{при } T_{mat} < T_{mt}; \\ 0, & \text{при } T_{mat} = T_{mt} \text{ та } u_{mat} \geq u_{mat}^*; \\ \alpha \cdot k_f f_{mat} N_c (T_{pov} - T_{mat}) & \text{при } T_{mat} > T_{mt} \text{ та } T_{mat} < T_{pov}. \end{cases} \quad (4-15)$$

Після нескладних перетворень з урахуванням (4-12) та підстановки відомих коефіцієнтів отримаємо остаточно

$$\frac{dT_{mat}}{dt} = \begin{cases} \frac{\alpha \cdot k_f \cdot 0,106 \cdot (T_{pov} - T_{mat})}{(u_{mat} + 1)m_{c,c} \cdot 750} & \text{при } T_{mat} < T_{mt}; \\ 0 & \text{при } T_{mat} = T_{mt} \text{ та } u_{mat} \geq u_{mat}^*; \\ \frac{\alpha \cdot k_f \cdot 0,106 \cdot (T_{pov} - T_{mat})}{(u_{mat} + 1)m_{c,c} \cdot 750} & \text{при } T_{mat} > T_{mt} \text{ та } T_{mat} < T_{pov}. \end{cases} \quad (4-16)$$

Початкові умови для цього диференційного рівняння  $T_{mat}(0) = T_{mat0}$ .

#### 4.4.3.3 Матеріальний баланс об'єкта управління відносно вологи, що знаходиться в матеріалі

Схема матеріальних потоків, за якими волога, що знаходиться в матеріалі, в процесі конвективної сушки переходить в теплоносій та виводиться за межі камерної сушарки, наводиться на рис. 4.6.

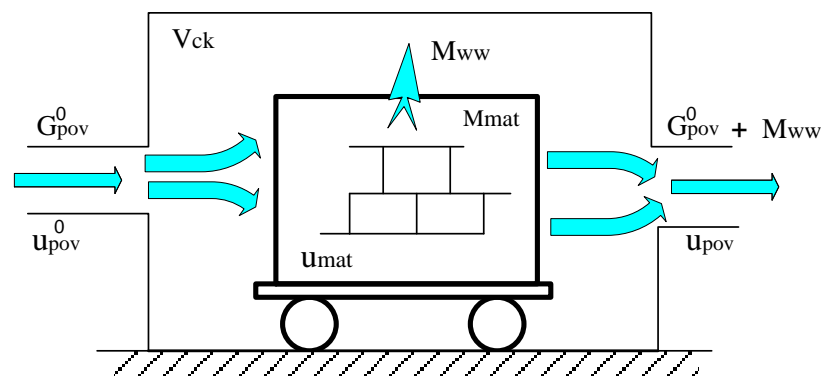


Рис. 4.6 - Схема матеріальних потоків об'єкта управління

Рівняння матеріального балансу відносно вологи, що знаходиться в матеріалі, в загальному вигляді

$$\Delta M_{wm} = M_{wm_n} - M_{wm_k} - M_{ww}, \quad (4-17)$$

де  $\Delta M_{wm}$  – швидкість зміни маси вологи в матеріалі в результаті висушування визначається виразом

$$\Delta M_{wm} = M_{mat_c} \cdot \frac{du_{mat}}{dt}, \quad (4-18)$$

де  $M_{mat_c}$  – маса сухого матеріалу, що висушується, кг, яка може бути визначена через кількість цегли в садкові  $N_c$  та суху масу однієї цеглини  $m_{c_c}$ , як  $M_{mat_c} = N_c \cdot m_{c_c}$ ;  $u_{mat}$  – вагова вологість матеріалу,  $\frac{\text{кг}}{\text{кг с.м.}}$ ;

$M_{wm_n}$ ,  $M_{wm_k}$  – маси вологи, що поступають в камеру та вивантажуються з камери з матеріалом, відповідно, в силу того, що процес відносно матеріалу є періодичним, відсутні, тобто

$$M_{wm_n} = M_{wm_k} = 0; \quad (4-19)$$

$M_{ww}$  – маса вологи, що випарується в процесі сушки з матеріалу в одиницю часу та переходить в зовнішнє середовище і змішується з теплоносієм. Для отримання виразу для визначення величини  $M_{ww}$  наведемо наступні міркування [ 3 ].

Кількість тепла, необхідного для випарування 1 кг вологи з вільної поверхні матеріалу в процесі сушіння

$$q_{wl} = W \cdot r, \quad (4-20)$$

де  $r = 2501 - 2,36 \cdot T_{mt}$  – питома теплота випарування вологи,  $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ , залежна від температури «мокрого термометра»  $T_{mt}$  для параметрів теплоносія;  $W$  – маса випареної вологи, кг.

Інтенсивність процесу випарування вологи з вільної поверхні матеріалу

$$j_{wl} = \frac{W}{F_{mat} \cdot t}, \quad (4-21)$$

де  $F_{mat}$  – поверхня випарування,  $\text{м}^2$ ;  $t$  – час, год.

Якщо  $W$  із останнього рівняння підставити в (4-20), то отримаємо

$$q_{wl} = j_{wl} \cdot F_{mat} \cdot (2501 - 2,36 \cdot T_{mt}), \quad (4-22)$$

З іншого боку тепловий потік від теплоносія при конвективному сушінні може бути

визначений за формулою Ньютона

$$q_{wl} = \alpha \cdot F_{mat} \cdot (T_{pov} - T_{mt}), \quad (4-23)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі від теплоносія з температурою  $T_{pov}$  до поверхні матеріалу з температурою  $T_{mt}$ , яка в ході активної стадії сушки дорівнює температурі «мокрого термометра».

Прирівнявши рівняння (4-22) та (4-23), знайдемо співвідношення для визначення інтенсивності випарування вологи в одиницю часу, тобто  $M_{ww}$

$$M_{ww} = j_{wl} = \frac{\alpha \cdot (T_{pov} - T_{mt})}{2501 - 2,36 \cdot T_{mt}}. \quad (4-24)$$

Аналогічно як і в випадку виведення рівняння теплового балансу відносно матеріалу, що висушується, вважається, що на першому та на третьому етапах сушки випарування не проходить. Процес сушки зосереджений виключно на другому етапі при виконанні аналогічних умов (див. п. 4.4.3.2). Тоді, підставивши в рівняння (4-17) співвідношення (4-18), (4-19) та (4-24), можна записати рівняння матеріального балансу відносно вологи в матеріалі, що висушується

$$M_{mat\_c} \cdot \frac{du_{mat}}{dt} = \begin{cases} 0, & \text{при } T_{mat} < T_{mt}; \\ -\frac{\alpha \cdot (T_{pov} - T_{mt})}{2501 - 2,36 \cdot T_{mt}}, & \text{при } T_{mat} = T_{mt} \text{ та } u_{mat} \geq u_{mat}^*; \\ 0, & \text{при } T_{mat} > T_{mt} \text{ та } T_{mat} < T_{pov}. \end{cases} \quad (4-25)$$

Після нескладних перетворень і заміні  $M_{mat\_c} = N_c \cdot m_{c\_c}$  отримаємо остаточно

$$\frac{du_{mat}}{dt} = \begin{cases} 0, & \text{при } T_{mat} < T_{mt}; \\ -\frac{\alpha \cdot (T_{pov} - T_{mt})}{(2501 - 2,36 \cdot T_{mt}) \cdot N_c \cdot m_{c\_c}}, & \text{при } T_{mat} = T_{mt} \text{ та } u_{mat} \geq u_{mat}^*; \\ 0, & \text{при } T_{mat} > T_{mt} \text{ та } T_{mat} < T_{pov}. \end{cases} \quad (4-26)$$

Початкові умови для цього диференційного рівняння  $u_{mat}(0) = u_{mat0}$

#### 4.4.3.4 Матеріальний баланс об'єкта управління відносно вологи, що знаходиться в теплоносії

Схема матеріальних потоків відносно вологи, що знаходиться в теплоносії, наводиться на рис. 4.6.

Рівняння матеріального балансу відносно вологи, що знаходиться в теплоносії, в загальному вигляді

$$\Delta M_{wp} = M_{wp\_n} - M_{wp\_k} + M_{ww}, \quad (4-27)$$

де  $\Delta M_{pov}$  – швидкість зміни маси вологи в теплоносії об'єму камерної сушарки  $V_{ck}$  за



рахунок висушування матеріалу визначається виразом

$$\Delta M_{wp} = V_{ck} \cdot \rho_{pov} \cdot \frac{du_{pov}}{dt}, \quad (4-28)$$

де  $\rho_{pov}$  – усереднена щільність теплоносія,  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ;  $u_{pov}$  – вологовміст теплоносія в камері сушарки, який визначається як відношення маси вологи в повітрі до одиниці маси сухого повітря,  $\frac{\text{кг}}{\text{кг с.п.}}$ ;

$M_{wp\_n}$  – маса вологи, що поступає в камерну сушарку разом з теплоносієм, визначається як

$$M_{wp\_n} = G_{pov}^0 \cdot \rho_{pov} \cdot u_{pov}^0, \quad (4-29)$$

де  $G_{pov}^0$  – об'ємна витрата теплоносія, що гріє, на вході в сушарку,  $\frac{\text{м}^3}{\text{год}}$ ;  $u_{pov}^0$  – вологовміст теплоносія на вході в сушарку,  $\frac{\text{кг}}{\text{кг с.п.}}$ ;

$M_{wp\_k}$  – маса вологи, що відводиться з камерної сушарку разом з теплоносієм, визначається як

$$M_{wp\_k} = (G_{pov}^0 \cdot \rho_{pov} + M_{ww}) \cdot u_{pov}, \quad (4-30)$$

де  $u_{pov}$  – вологовміст теплоносія на виході з сушарки, який завдяки прийнятому припущенню про режим ідеального перемішування дорівнює вологовмісту в об'ємі сушарки;  $M_{ww}$  – маса вологи, що випарюється в процесі сушки з матеріалу та об'єднується з об'ємом теплоносія;

$M_{ww}$  – маса вологи, що випарюється в процесі сушки з матеріалу в одиницю часу та змішується з теплоносієм, визначається виразом, аналогічним тому, що був отриманим в п.4.4.3.3, але з протилежним знаком (див. формулу (4-24)).

Враховуючи те, що процес випарювання здійснюється тільки на другому етапі сушки і підставивши вирази (4-28), (4-29), (4-30) та (4-24) в рівняння (4-27) отримаємо рівняння матеріального балансу об'єкта управління відносно вологи, що знаходиться в теплоносії в вигляді

$$V_{ck} \cdot \rho_{pov} \cdot \frac{du_{pov}}{dt} = \begin{cases} G_{pov}^0 \rho_{pov} (u_{pov}^0 - u_{pov}), & \text{при } T_{mat} < T_{mt}; \\ G_{pov}^0 \rho_{pov} u_{pov}^0 - (G_{pov}^0 \cdot \rho_{pov} + M_{ww}) u_{pov} + \frac{\alpha(T_{pov} - T_{mt})}{2501 - 2,36 \cdot T_{mt}}, & \text{при } T_{mat} = T_{mt} \text{ та } u_{mat} \geq u_{mat}^*; \\ G_{pov}^0 \rho_{pov} (u_{pov}^0 - u_{pov}), & \text{при } T_{mat} > T_{mt} \text{ та } T_{mat} < T_{pov}. \end{cases} \quad (4-31)$$

Після нескладних перетворень отримаємо остаточно

$$\frac{du_{pov}}{dt} = \begin{cases} \frac{G_{pov}^0 \cdot (u_{pov}^0 - u_{pov})}{V_{ck}}, & \text{при } T_{mat} < T_{mt}; \\ \frac{G_{pov}^0 \cdot u_{pov}^0}{V_{ck}} - \frac{(G_{pov}^0 \cdot \rho_{pov} + M_{ww}) u_{pov}}{V_{ck} \cdot \rho_{pov}} + \frac{\alpha \cdot (T_{pov} - T_{mt})}{V_{ck} \cdot \rho_{pov} (2501 - 2,36 \cdot T_{mt})}, & \text{при } T_{mat} = T_{mt} \text{ та } u_{mat} \geq u_{mat}^*; \\ \frac{G_{pov}^0 \cdot (u_{pov}^0 - u_{pov})}{V_{ck}}, & \text{при } T_{mat} > T_{mt} \text{ та } T_{mat} < T_{pov}. \end{cases} \quad (4-32)$$

Початкові умови для цього диференційного рівняння  $u_{pov}(0) = u_{pov0}$

#### 4.4.4 Складання математичної моделі об'єкта управління (камерної сушарки періодичної дії) та її аналіз

Як відомо [12] мета математичної постановки задачі (або створення математичної моделі) - одержання сукупності математичних співвідношень, які описують поведінку і властивості об'єкта моделювання. Формально математична модель являє собою сукупність залежностей між вхідними і вихідними змінними, що відображають фізичну (або іншу) сутність процесів, що відбуваються в об'єкті з той чи іншою точністю.

Для отримання математичної моделі камерної сушарки періодичної дії формально зведемо отримані вище вирази (4-9), (4-16), (4-26) та (4-32) для визначення теплових та матеріальних балансів в систему чотирьох диференціальних рівнянь першого порядку в вигляді

$$\frac{dT_{pov}}{dt} = \frac{G_{pov}^0 \cdot T_{pov}^0}{V_{ck}} - \frac{(1 + \beta_{pt}) \cdot (G_{pov}^0 \cdot \rho_{pov} + M_{ww}) \cdot T_{pov}}{V_{ck} \cdot \rho_{pov}} - \frac{0,106 \cdot \alpha \cdot k_f \cdot N_c \cdot (T_{pov} - T_{mat})}{V_{ck} \cdot \rho_{pov} \cdot c_{p,pov}}; \quad (4-33a)$$

$$\frac{dT_{mat}}{dt} = \begin{cases} \frac{\alpha \cdot k_f \cdot 0,106 \cdot (T_{pov} - T_{mat})}{(u_{mat} + 1) m_{c,c} \cdot 750} & \text{при } T_{mat} < T_{mt}; \\ 0 & \text{при } T_{mat} = T_{mt} \text{ та } u_{mat} \geq u_{mat}^*; \\ \frac{\alpha \cdot k_f \cdot 0,106 \cdot (T_{pov} - T_{mat})}{(u_{mat} + 1) m_{c,c} \cdot 750} & \text{при } T_{mat} > T_{mt} \text{ та } T_{mat} < T_{pov}; \end{cases} \quad (4-33б)$$

$$\frac{du_{mat}}{dt} = \begin{cases} 0, & \text{при } T_{mat} < T_{mt}; \\ -\frac{\alpha \cdot (T_{pov} - T_{mat})}{(2501 - 2,36 \cdot T_{mt}) \cdot N_c \cdot m_{c,c}}, & \text{при } T_{mat} = T_{mt} \text{ та } u_{mat} \geq u_{mat}^*; \\ 0, & \text{при } T_{mat} > T_{mt} \text{ та } T_{mat} < T_{pov}; \end{cases} \quad (4-33в)$$

$$\frac{du_{pov}}{dt} = \begin{cases} \frac{G_{pov}^0 \cdot (u_{pov}^0 - u_{pov})}{V_{ck}}, & \text{при } T_{mat} < T_{mt}; \\ \frac{G_{pov}^0 \cdot u_{pov}^0}{V_{ck}} - \frac{(G_{pov}^0 \cdot \rho_{pov} + M_{ww}) u_{pov}}{V_{ck} \cdot \rho_{pov}} + \frac{\alpha \cdot (T_{pov} - T_{mat})}{V_{ck} \cdot \rho_{pov} (2501 - 2,36 T_{mt})}, & \text{при } T_{mat} = T_{mt} \text{ та } u_{mat} \geq u_{mat}^*; \\ \frac{G_{pov}^0 \cdot (u_{pov}^0 - u_{pov})}{V_{ck}}, & \text{при } T_{mat} > T_{mt} \text{ та } T_{mat} < T_{pov}; \end{cases} \quad (4-33г)$$

при початкових умовах

$$T_{пов}(0) = T_{пов0}, T_{mat}(0) = T_{mat0}, u_{mat}(0) = u_{mat0} \text{ та } u_{пов}(0) = u_{пов0}, \quad (4-33d)$$

та доповнимо її виразом (4-24) для визначення маси випареної вологи

$$M_{ww} = \frac{\alpha \cdot (T_{пов} - T_{mt})}{2501 - 2,36 \cdot T_{mt}}. \quad (4-33e)$$

В цій системі вихідними, залежними змінними є:  $T_{пов}$  – температура теплоносія;  $T_{mat}$  – температура матеріалу, що висушується;  $u_{mat}$  – вологість матеріалу, що висушується та  $u_{пов}$  – вологовміст теплоносія, тобто чотири змінні. Для їх знаходження маємо в розпорядженні чотири рівняння. Таким чином розроблена модель (32a) – (32d) математично замкнута і може бути використана для моделювання розглянутих процесів.

Однак, в розробленій математичній моделі в виразах (32б) – (33e) в обмежуючих умовах використовується параметр  $T_{mt}$  – температура «мокрого термометра», що є величиною, яка характеризує термодинамічний стан вологого повітря (теплоносія) та може бути визначена на основі відомих параметрів теплоносія в камерній сушарці, а саме: температури  $T_{пов}$ , відносної вологості  $Fi_{пов}$  та барометричного тиску  $P_{atm}$ .

#### 4.4.5 Розроблення математичної моделі, алгоритму та програми для визначення параметрів стану вологого повітря

Завдання полягає у розробленні на базі літературних джерел алгоритму розрахунку та, спираючись на нього, математичну модель, що дозволила б визначати основні параметри властивостей стану вологого ненасиченого повітря та мала б вигляд автономного блоку [13].

Як вхідні дані для розрахунку повинні бути використані такі змінні:

- ✓ температура волого повітря  $T_{п}$ , °C;
- ✓ відносна вологість повітря  $\phi$ , %;
- ✓ барометричний тиск  $P_{атм}$ , Па.

На першому етапі розв'язання задачі знаходяться параметри стану вологого повітря при заданих вхідних даних.

Відомо, що ентальпія вологого повітря при температурі  $T_{п}$  визначається з виразу

$$I = T_{п} + (2501 - 1,93 \cdot T_{п}) \cdot d, \text{ кДж/кг}, \quad (4-34)$$

де  $d$  – вологовміст вологого повітря при температурі  $T_{п}$ , кг/кг с.п.

Вологовміст вологого повітря в свою чергу визначається як

$$d = 0.6221 \frac{\left(\frac{\varphi}{100}\right) \cdot P_H}{P_{\text{атм}} - \left(\frac{\varphi}{100}\right) \cdot P_H}, \text{ кг/кг с.п.}, \quad (4-35)$$

де  $P_H$  – парціальний тиск насиченої водяної пари при температурі вологого повітря  $T_{\text{п}}$ , який можна визначити за емпіричною формулою

$$P_H = \exp\left(\frac{16.57 \cdot T_{\text{п}} - 115.72}{233.77 + 0.977 \cdot T_{\text{п}}}\right) \cdot 10^3, \text{ Па}, \quad (4-36)$$

Температуру «мокрого термометра», яку вологе повітря набуває в стані насичення, називають також температурою адіабатного насичення повітря. Процес переходу пароповітряної суміші в цей стан при випарюванні води відбувається адіабатно (тобто без теплообміну з навколишнім середовищем) при незмінній ентальпії. Використовуючи цю обставину, в був отриманий функціональний зв'язок між температурою вологого повітря  $T_{\text{п}}$ , температурою «мокрого термометра»  $T_{\text{мт}}$  і вологовмістом вологого повітря  $d$  у вигляді

$$T_{\text{мт}} = T_{\text{п}} - \frac{r_{\text{мт}} \cdot (d_{\text{мт}} - d)}{c_{p_{\text{пов}}} + c_{p_{\text{пар}}} \cdot d}, \quad ^\circ\text{C} \quad (4-37)$$

де  $r_{\text{мт}}$  – питома теплота пароутворення при температурі «мокрого термометра», кДж/(кг·°C), яка пов'язана з температурою «мокрого термометра» емпіричним виразом

$$r_{\text{мт}} = 2501 - 2.369 \cdot T_{\text{мт}}, \text{ кДж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)}; \quad (4-38)$$

$d_{\text{мт}}$  – вологовміст вологого повітря при температурі «мокрого термометра», кг/кг с.п.;  $c_{p_{\text{пов}}}$  і  $c_{p_{\text{пар}}}$  – питомі теплоємності при постійному тиску сухого повітря та пари відповідно, прийняті постійними величинами:  $c_{p_{\text{пов}}} = 1,006 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$  і  $c_{p_{\text{пар}}} = 1,96 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$ .

Для визначення вологовмісту повітря в точці насичення при температурі «мокрого термометра»  $T_{\text{мт}}$  скористаємось рівнянням (4-35) з урахуванням того, що в цій точці відносна вологість  $\varphi=100\%$

$$d_{\text{мт}} = 0.6221 \frac{P_{\text{мт}}}{P_{\text{атм}} - P_{\text{мт}}}, \text{ кг/кг с.п.}; \quad (4-39)$$

$P_{\text{мт}}$  – парціальний тиск водяної пари при температурі «мокрого термометра»  $T_{\text{мт}}$ , для визначення якого можна використовувати емпіричне рівняння (4-36)

$$P_{\text{мт}} = \exp\left(\frac{16.57 \cdot T_{\text{мт}} - 115.72}{233.77 + 0.977 \cdot T_{\text{мт}}}\right) \cdot 10^3, \text{ Па}, \quad (4-40)$$

Як залежні змінні системи рівнянь (4-34) – (4-40), що підлягають визначенню виступають: ентальпія  $I$ ; вологовміст вологого та насиченого повітря  $d$  і  $d_{\text{мт}}$  відповідно; парціальний тиск пари

у вологому та насиченому повітрі  $P_H$  та  $P_{MT}$  відповідно; температура насичення або «мокрого термометра»  $T_{MT}$  та прихована теплота пароутворення  $r_{MT}$  при температурі «мокрого термометра». Усього сім змінних. Для їх визначення отримано сім співвідношень (4-34) – (4-40). Умова замикання виконується, отже система (4-34) - (4-40) має єдине рішення.

На підставі розглянутого вище алгоритму в середовищі математичного пакета MathCad [14] була розроблена програма розрахунку температури «мокрого термометра», представлена в Додатку Б (рис Б.1).

#### 4.4.6 Розробка та перевірка працездатності математичної моделі об'єкту управління

З урахуванням розробленої математичної моделі технологічного процесу висушування матеріалу в камерній сушарці, представленої в п. 4.4.4 та алгоритму визначення температури «мокрого термометра» (див. п. 4.4.6) була розроблена структурна схема математичної моделі, представлена на рис. 4.7, та програма рішення математичної моделі в середовищі математичного пакета *MathCad*, представлена Додатку Б (рис. Б.2).

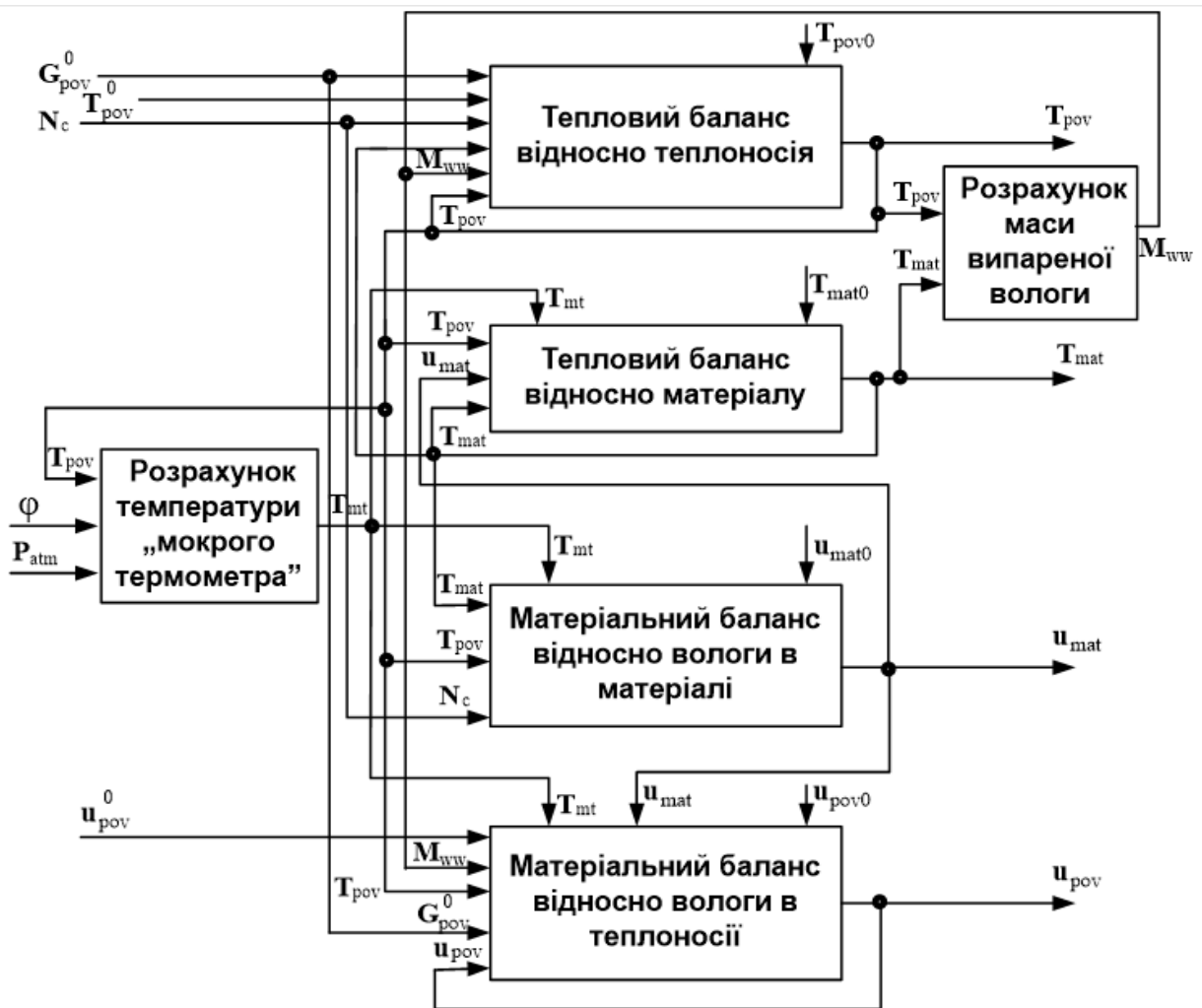


Рис. 4.7 - Структурна схема математичної моделі об'єкту управління - камерної сушарки періодичної дії

Аналіз інформаційних потоків на структурній схемі математичної моделі (рис. 4.7) показав, що технологічний процес висушування матеріалу в камерній сушарці являє собою багатовимірний квазістаціонарний об'єкт управління з перехресними зв'язками. А наявність внутрішніх зворотних зв'язків дозволяє віднести його до об'єктів з самовирівнюванням.

Щоб переконатись в вірності висновків аналізу та в принциповій працездатності розробленої моделі і програми було проведено пробне імітаційне моделювання технологічного процесу висушування матеріалу в камерній сушарці при значеннях довільно взятих вхідних змінних: кількість цеглин в садку  $N_c = 2000$  шт., об'ємна витрата теплоносія, що гріє,  $G_{rov}^0 = 5400 \frac{m^3}{год}$ , температура теплоносія на вході в сушарку  $T_{rov}^0 = 50$  °С, температура матеріалу для сушіння при завантаженні  $T_{mato} = 20$  °С, вологість цегли-сирця при завантаженні  $u_{mato} = 0.25 \frac{кг}{кг \text{ с.м.}}$ , вологовміст теплоносія на вході в сушарку  $u_{rov}^0 = 0.02 \frac{кг}{кг \text{ с.п.}}$ , відносна вологість теплоносія  $\varphi = 45$  %, атмосферний тиск  $P_{atm} = 99310$  Па.

Параметри (коефіцієнти) математичної моделі були взяті з літературних джерел та довідників для усереднених значень очікуваних в процесі температур та конструктивних параметрів умовної сушарки. Прийняті значення параметрів приводяться в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Параметри математичної моделі сушарки, використані для моделювання

№	Найменування параметра	Позначення	Од. виміру	Значення
1	Об'єм сушарки	$V_{ck}$	м <sup>3</sup>	8
2	Щільність теплоносія	$\rho_{rov}$	$\frac{кг}{м^3}$	1.2
3	Теплоємність ізобарна теплоносія	$c_{p_{rov}}$	$\frac{Дж}{кг \cdot К}$	1005
4	Теплоємність ізобарна цегли	$c_{p_{mat}}$	$\frac{Дж}{кг \cdot К}$	750
5	Площа поверхні одинарної цеглини	$f_{mat}$		0.106
6	Маса одинарної цеглини	$m_{c_c}$		3,5
7	Коефіцієнт тепловіддачі від теплоносія до цегли	$\alpha$	$\frac{Дж}{м^2 \cdot К \cdot год}$	54000
8	Коефіцієнт втрат тепла	$\beta_{pt}$	-	0.08
9	Коефіцієнт корекції площі поверхні теплопередачі	$k_f$	-	0.9
10	Величина рівноважної вологості цегли	$u_{mat}^*$	$\frac{кг}{кг \text{ с. м.}}$	0.05

Результати моделювання при вказаних вище вхідних змінних та параметрах представлені на рис. 4.8 та рис. 4.9. На рис. 4.8 представлені графіки залежності від часу сушіння температури теплоносія на виході з камери  $T_{пов}(t)$  та матеріалу, що висушується,  $T_{mat}(t)$ .

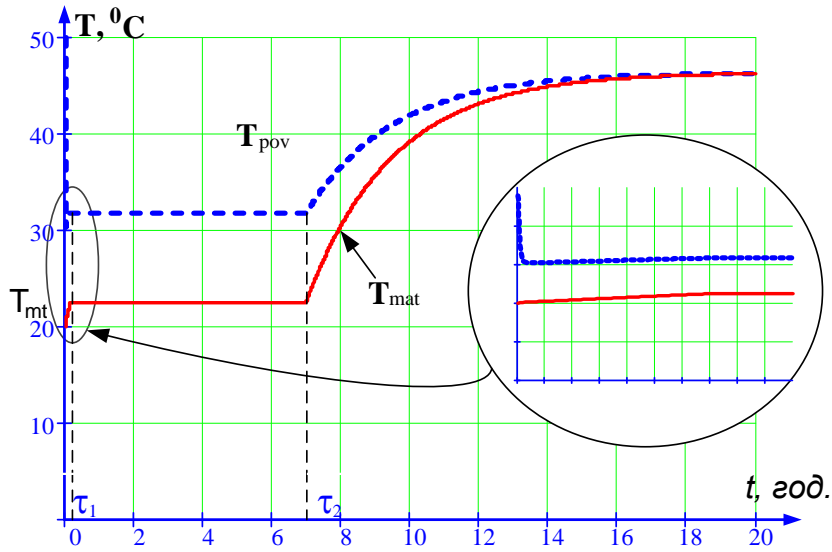


Рис. 4.8 - Моделювання теплових процесів в камерній сушарці періодичної дії

На рис. 4.9 представлені графіки залежності від часу сушіння вологості матеріалу, що сушиться,  $u_{mat}(t)$  та вологовмісту теплоносія на виході з камери  $u_{пов}(t)$ . Порівнюючи залежності  $u_{mat}(t)$  за рис. 4.9 та  $T_{mat}(t)$  з рис. 4.8 з відповідними графіками, зображеними на рис. 4.3 (див. п. 4.3), можна переконатись, що вони досить добре збігаються (на якісному, звичайно, рівні), що є вагомим підтвердженням адекватності побудованої математичної моделі.

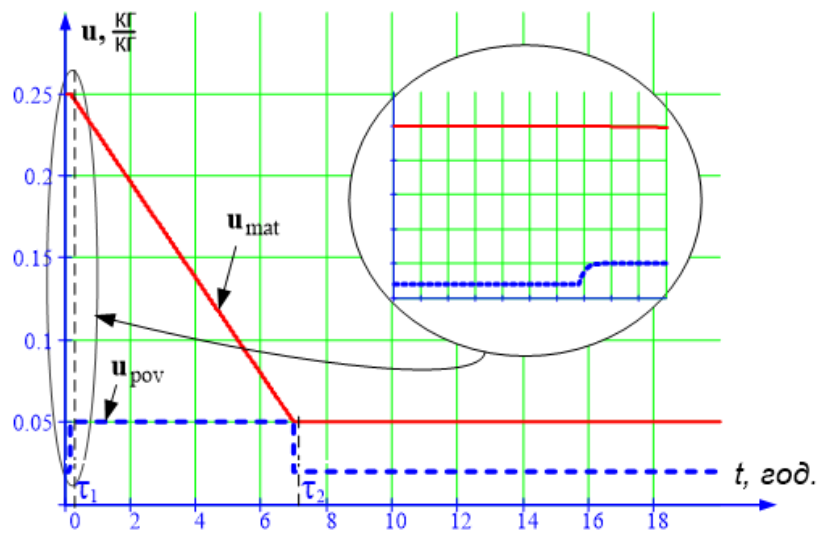


Рис. 4.9 - Моделювання процесів зміни вологості в камерній сушарці періодичної дії

Крім того, результати моделювання підтверджують факт наявності в об'єкті двох процесів з кардинально відмінними динамічними властивостями: високо інерційні теплові процеси (рис. 4.8) та низько інерційні – процеси зміни вологості (рис.4.9). Різниця в постійних часу складає порядки, що дозволяє процеси зміни вологості вважати безінерційними.

#### 4.4.7 Аналіз статичних характеристик об'єкту управління та вибір каналів впливу

Аналіз структурної схеми математичної моделі об'єкта (рис. 4.7) дозволив визначити основні канали впливу вхідних змінних на вихідні змінні, які наведено на рис. 4.10.

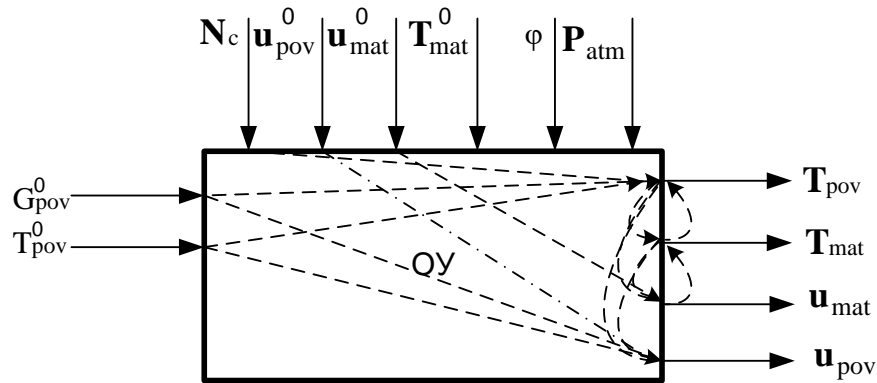


Рис. 4.10 - Схема каналів впливу об'єкту управління

Як можна побачити, вхідні змінні, що керують, а саме об'ємна витрата теплоносія, що гріє,  $G_{pov}^0$  та температура теплоносія на вході в сушарку  $T_{pov}^0$ , безпосередньо впливають лише на дві з чотирьох вихідних змінних, а саме на температуру теплоносія на виході з камери  $T_{pov}$  та вологовміст теплоносія  $u_{pov}$ . Температура  $T_{mat}$  та вологість  $u_{mat}$  матеріалу, що висушується, залежить від них опосередковано, через вихідну змінну  $T_{pov}$ .

Наявність двох каналів впливу вимагає проведення дослідження щодо порівняння сили впливу різних вхідних змінних керування на відповідні вихідні змінні для визначення ефективного каналу управління. Для цього в системі рівнянь (4-33a) - (4-33e) математичної моделі об'єкта всі похідні прирівнюємо нулю, тобто формуємо математичну модель статички об'єкта для можливості отримання основних статичних характеристик. При цьому треба прийняти до уваги наступні міркування:

- 1) відсутність прямого впливу  $G_{pov}^0$  та  $T_{pov}^0$  на вихідні змінні  $T_{mat}$  та  $u_{mat}$  дозволяє виключити з моделі статички рівняння (4-33б) та (4-33в) як такі, що стають тотожностями;
- 2) статичну характеристику будемо формувати для другого етапу сушіння, маючи на увазі, що процеси першого та третього етапу відіграють допоміжну роль і на практиці ніколи не досягають усталеного режиму роботи;



- 3) враховуючи той факт, що в режимі активного сушіння (другий етап) температура матеріалу  $T_{mat}$  фактично зберігається на рівні температури «мокрого термометра», виконаємо відповідну заміну, використавши для цього рівняння (4-37), тобто алгоритм розрахунку  $T_{mt}$ .

В результаті отримаємо систему алгебраїчних рівнянь

$$\frac{G_{пов}^0 \cdot T_{пов}^0}{V_{ск}} - \frac{(1 + \beta_{пт}) \cdot (G_{пов}^0 \cdot \rho_{пов} + M_{ww}) \cdot T_{пов}}{V_{ск} \cdot \rho_{пов}} - \frac{0,106 \cdot \alpha \cdot k_f \cdot N_c \cdot (T_{пов} - T_{mt})}{V_{ск} \cdot \rho_{пов} \cdot c_{пов}} = 0; \quad (4-41a)$$

$$\frac{G_{пов}^0 u_{пов}^0}{V_{ск}} - \frac{(G_{пов}^0 \rho_{пов} + M_{ww}) u_{пов}}{V_{ск} \cdot \rho_{пов}} + \frac{\alpha \cdot (T_{пов} - T_{mt})}{V_{ск} \rho_{пов} (2501 - 2,36 T_{mt})} = 0; \quad (4-41б)$$

$$M_{ww} = \frac{\alpha \cdot (T_{пов} - T_{mt})}{2501 - 2,36 \cdot T_{mt}}. \quad (4-41в)$$

Програма розрахунку статичних характеристик технологічного процесу висушування матеріалу в каменій сушарці, розроблена в математичному пакеті MathCad, наведена в Додатку Б (рис. Б.3).

Використовуючи розроблену програму нами було проведено імітаційне моделювання статичних характеристик відповідно до каналів впливу, показаних на рис. 4.10, а саме залежності  $T_{пов}(G_{пов}^0)$ ,  $T_{пов}(T_{пов}^0)$ ,  $u_{пов}(G_{пов}^0)$  та  $u_{пов}(T_{пов}^0)$ . Результати чисельного експерименту представлені в Додатку Б (рис. Б.4).

За результатами чисельного експерименту побудовані відповідні графіки статичних характеристик (див. рис. 4.11 та рис. 4.12).

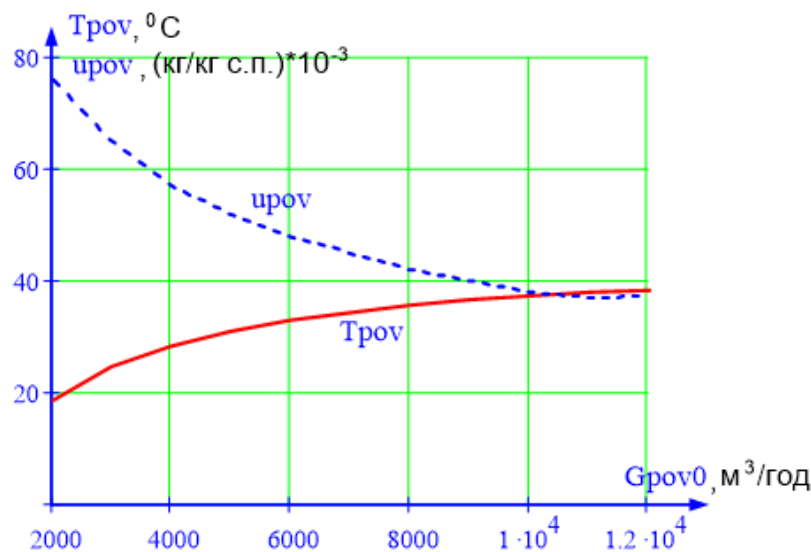


Рис. 4-11 - Статичні характеристики об'єкта за каналами  $T_{пов}(G_{пов}^0)$  та  $u_{пов}(G_{пов}^0)$

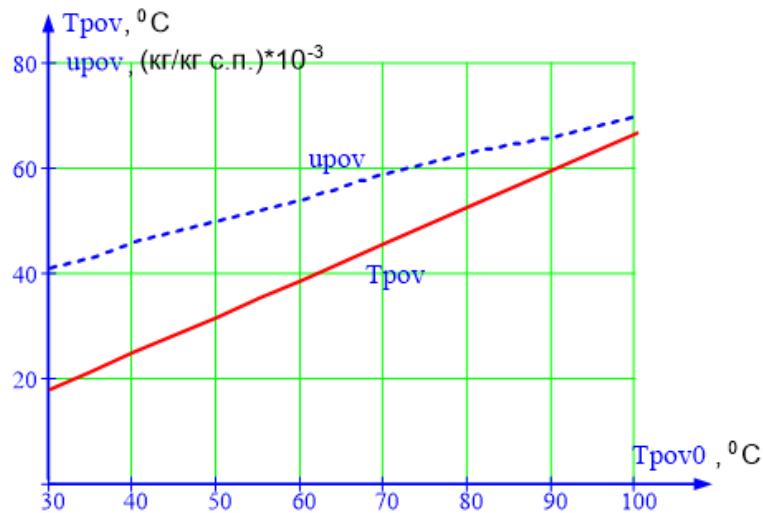


Рис. 4-12 - Статичні характеристики об'єкта за каналами  $T_{pov}(T_{pov}^0)$  та  $u_{pov}(T_{pov}^0)$

Аналіз статичних характеристик дозволяє зробити наступні висновки:

- залежність температури та вологовмісту теплоносія на виході камерної сушарки (рис. 4.12) від температури теплоносія на вході  $T_{pov}^0$  є лінійною з коефіцієнтами передачі  $k_{21} = 0.7 \text{ } ^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$  та  $k_{22} = 0.4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/кг}/^\circ\text{C}$ , відповідно;
- залежність температури та вологовмісту теплоносія на виході камерної сушарки (рис. 4.11) від об'ємного приходу теплоносія на вході  $G_{pov}^0$  є не лінійною з усередненими коефіцієнтами передачі  $k_{11} = 1.8 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}/\frac{\text{м}^3}{\text{год}}$  та  $k_{12} = -0.4 \cdot 10^{-5} \frac{\text{кг}}{\text{кг}}/\frac{\text{м}^3}{\text{год}}$ , відповідно, з тенденцією зменшення до нуля при збільшенні величини  $G_{pov}^0$ ;
- порівняння коефіцієнтів передачі за каналами впливу  $T_{pov}(G_{pov}^0)$  та  $T_{pov}(T_{pov}^0)$  ( $k_{11} \gg k_{21}$ ) дозволяє зробити висновок про доцільність використання для регулювання температури на виході сушарки  $T_{pov}$  температури теплоносія на вході  $T_{pov}^0$ ;
- для забезпечення відносної незалежності каналів впливу  $T_{pov}(G_{pov}^0)$  та  $T_{pov}(T_{pov}^0)$  бажано стабілізувати величину об'ємного приходу теплоносія на вході  $G_{pov}^0$  на регламентному рівні.

## 4.5 Синтез системи управління процесу сушіння матеріалу в камерній сушарці періодичної дії

### 4.5.1 Вибір функціональної структури системи управління

Конструктивно-технологічний аналіз об'єкта управління (камерної сушарки періодичної дії), аналіз вимог щодо проведення технологічного процесу сушіння та результати дослідження отриманих математичних моделей динаміки та статички дозволяють сформулювати вимоги до системи управління, що синтезується, а саме:

1. Для забезпечення зменшення бракованої продукції в умовах наявності зовнішніх збурень необхідно жорстко витримувати норми технологічного регламенту щодо допустимої температури  $T_{rov}$  в камері сушарки та гідродинамічного режиму обдування матеріалу шляхом стабілізації величини об'ємного приходу теплоносія на вході  $G_{rov}^0$ .
2. Зменшення непродуктивних витрат теплової енергії на сушіння матеріалу можна досягти в результаті своєчасного завершення циклу висушування в умовах змінних початкових умов, для розрахунку тривалості якого доцільно використати розроблену математичну модель динаміки (4-33).

Функціональна схема системи управління технологічним процесом сушіння в камерній сушарці періодичної дії, що реалізує вказані вимоги, має вигляд, наведений на рис. 4.13.

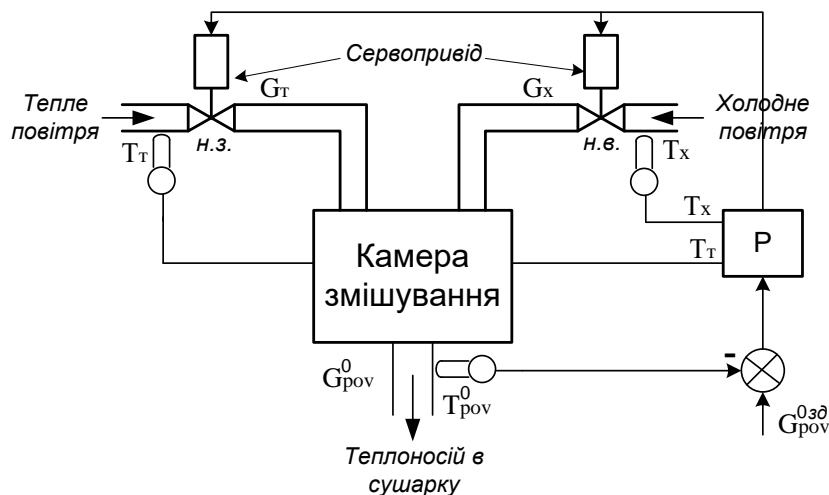


Рис. 4-13 - Функціональна схема системи управління температурою теплоносія

Так як процес сушіння йде при незмінній температурі поверхні матеріалу (див. рис. 4.8) , а значить головними факторами, що можуть порушити тепловий режим є зовнішні впливи, а також маючи на увазі суттєву теплову інерцію камерної сушарки, що ускладнює створення високоякісної системи стабілізації, прийнято рішення стабілізувати температуру теплоносія на вході в сушарку  $T_{rov}^0$  шляхом зміни співвідношення об'ємних потоків теплового  $G_T$  з температурою  $T_T$ , яка має

властивість мінятись, повітря та холодного  $G_x$  з температурою  $T_x$ , холодного атмосферного повітря.

Щоб одночасно забезпечити постійну задану величину об'ємного приходу в камерну сушарку теплоносія з заданою температурою  $T_{rov}^0$ , для управління використаємо два сервоприводи, які працюють асинхронно, тобто при переміщенні заслінки теплого повітря в одну сторону одночасно заслінка холодного повітря переміщується в іншу, чим забезпечується незмінність подачі об'єму теплоносія при зміні його температури.

#### 4.5.2 Математична модель об'єкта управління – камери змішування потоків

Об'єкт управління являє собою (див. рис. 4-13) камеру змішування, в яку підводяться для змішування до необхідної температури  $T_{rov}^0$  потік теплого повітря з температурою  $T_T$  та холодного – з температурою  $T_x$ . Для зміни величини об'ємного розходу використовуються сервоприводи, які працюють в асинхронному режимі.

Невеликий об'єм камери змішування при відносно великих швидкостях потоків дозволяють допустити, що гідродинамічний режим процесу змішування – ідеальне перемішування, а обмежений діапазон температур теплоносія та його компонентів (не більше 100 °С) дають можливість вважати, що їх тепло-фізичні параметри не залежать від температури та складу и визначаються як деякі середні величини.

Тепловий баланс для камери змішування [12]

$$V_{cm} \cdot \rho \cdot c_p \cdot \frac{dT_{rov}^0}{dt} = G_T \cdot \rho \cdot c_p \cdot T_T + G_x \cdot \rho \cdot c_p \cdot T_x - (G_x + G_T) \cdot \rho \cdot c_p \cdot T_{rov}^0, \quad (4-42)$$

де  $V_{cm}$  – об'єм камери змішування;  $\rho, c_p$  – щільність та питома ізобарна теплоємність теплоносія та його компонентів;  $T_{rov}^0, T_x, T_T$  – температури теплоносія після камери змішування, холодного та теплого повітря, відповідно;  $G_x, G_T$  – об'ємний розхід відповідно холодного та теплого повітря.

Після нескладних перетворень, скорочення на  $\rho \cdot c_p$  та виразивши об'ємний розхід холодного та теплого повітря через його задане значення  $G_{rov}^0$  і долю відкриття заслінки  $\Delta u$  (приймаємо, що об'ємний розхід повітря прямо пропорційний долі відкриття заслінки), тобто  $G_T = G_{rov}^0 \cdot \Delta u$  та  $G_x = G_{rov}^0 \cdot (1 - \Delta u)$ , отримаємо

$$\frac{V_{cm}}{G_{rov}^0} \cdot \frac{dT_{rov}^0}{dt} + T_{rov}^0 = \Delta u \cdot T_T + (1 - \Delta u) \cdot T_x. \quad (4-43)$$

Структурна схема математичної моделі камери змішування продемонстрована на рис. 4.14, а результати моделювання при  $G_{rov}^0 = 5400 \frac{m^3}{год}$ ,  $V_{cm} = 0,15 m^3$ ,  $T_T = 80 \text{ } ^\circ C$ ,  $T_x = 20 \text{ } ^\circ C$  на рис. 4.15.

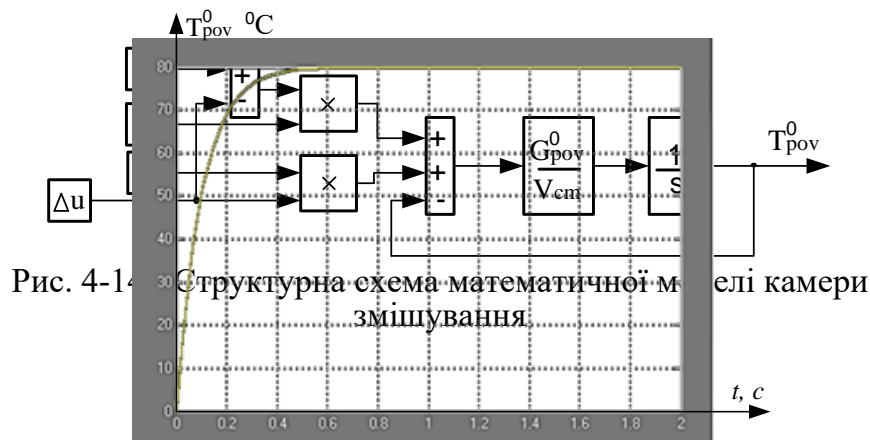


Рис. 4-15 - Результати моделювання камери змішування

#### 4.5.3 Математична модель сервопривода

Малогабаритні швидкодіючі сервоприводи в наш час широко використовуються в різноманітних сучасних високоточних системах управління, в тому числі і для переміщення та позиціонування органів регулювання. Найчастіше промислові системи управління положенням приводу будуються за принципами підлеглого регулювання.

В роботі [16] наводиться методика побудови математичної моделі сервопривода на основі електродвигуна постійного струму з незалежним збудженням з підпорядкованим керуванням положення та швидкості.

Зазвичай в системах підпорядкованого управління використовують три контури. Якщо необхідно регулювати положення, то найкраще, чим можна при цьому управляти – це швидкістю (частотою обертання), оскільки саме швидкість безпосередньо впливає на зміну положення (швидкість – похідна від положення), інші величини (струм, напруга і інше) впливають на положення опосередковано, не зручно для регулювання. Якщо треба регулювати швидкість, то для її регулювання краще вибрати момент двигуна, оскільки момент визначає прискорення приводу, а воно найпростішим математичним законом пов'язане зі швидкістю. Так як для двигуна момент – це струм, то для регулювання моменту потрібно керувати напругою на інверторі перетворювача, тому що струм і напруга теж пов'язані у першому наближенні простим диференціальним рівнянням.

Якщо якийсь внутрішній контур опустити, то положення буде регулюватися, але погано, не з такою швидкодією, як у системі з трьома контурами. Якщо немає, наприклад, контуру струму, то

залишитися безконтрольним момент приводу (струм) – він змінюватиметься довільно. Проте в сервоприводах, призначених для переміщення органів регулювання запірної арматури суттєвої зміни моменту не очікується, а значить схему управління можна спростити.

Рівняння замкнутої системи в операторній формі мають вигляд [16]

$$\begin{cases} \omega = \frac{rK_d^2}{T_M p} (M - M_c), \\ M = \frac{1/rK_d}{T_\alpha p + 1} \left( U - \frac{1}{K_d} \omega \right), \\ \varphi = \frac{n\omega}{p}, \\ U = K_p (\varphi_3 - \varphi). \end{cases} \quad (4-44)$$

Тут  $r$  – повний активний опір якріного ланцюга (Ом);  $\omega$  – механічна швидкість обертання ротора (рад/с);  $M$  – момент обертання, що створюється двигуном (Н\*м);  $M_c$  – момент статичного навантаження, приведений до валу двигуна (Н\*м);  $K_d = K\Phi$  (рад/В\*с), де  $K$  – безрозмірний конструктивний коефіцієнт двигуна,  $\Phi$  – магнітний потік збудження двигуна, який створюється постійним магнітом (Вб);  $T_M$  – електромеханічна постійна часу привода (с);  $T_\alpha$  – електромагнітна постійна якріного ланцюга (с);  $U$  – напруга на обмотці якоря двигуна (В);  $\varphi$  – кут повороту вихідного валу сервопривода (рад);  $n$  – передаточне число редуктора;  $K_p$  – коефіцієнт підсилення П-регулятора (В/рад);  $\varphi_3$  – заданий кут повороту вихідного валу сервопривода (рад).

Структурна схема сервопривода відповідно до моделі (4-44) наведена на рис. 4.16.

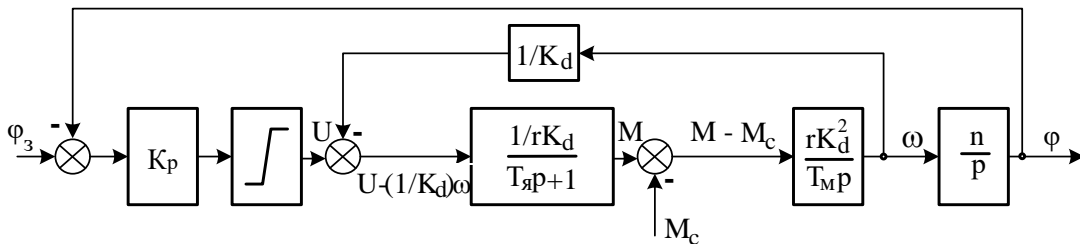


Рис. 4.16 - Структурна схема математичної моделі сервопривода

Якщо розв'язати систему рівнянь (4-44) відносно  $\varphi$ , то отримаємо

$$\varphi(p) = \frac{\varphi_3(p) - r \frac{K_d}{K_p} (T_\alpha p + 1) M_c}{T_\alpha T_M T_c p^3 + T_M T_c p^2 + T_c p + 1}, \quad (4-45)$$

$$\text{де } T_c = \frac{1}{n K_d K_p}.$$

Підбором відповідного характеристичного полінома замкнутої системи (4-45) можна отримати задовільні динамічні властивості сервопривода (підбором відповідної величини коефіцієнта підсилення  $K_p$ ). Як еталонний поліном використовуємо характеристичний поліном на

основі бінома Ньютона [15]:

$$H(p) = (p + \omega_0)^n, \quad (4-46)$$

де  $\omega_0$  – параметр полінома;  $n = 3$  – порядок полінома. Для забезпечення монотонності перехідного процесу без перерегулювання корні полінома (4-46) вибираєм кратні, дійсні та від’ємні. Порівнявши характеристичні поліноми (4-45) та (4-46) Знаходимо розрахункові співвідношення  $T_M=1/\omega_0$ ;  $T_c = 3/\omega_0$ ;  $T_я=1/3\omega_0$ . Перехідна характеристика сервопривода при вибраному параметрові полінома  $\omega_0=1$  представлена на рис. 4.17.

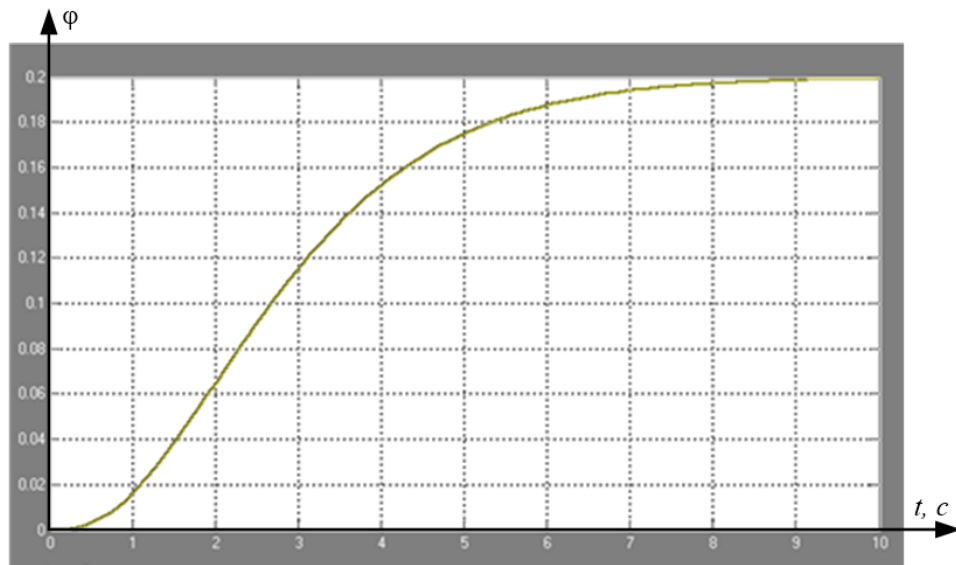


Рис. 4.17 - Перехідна характеристика сервопривода при ступінчатій зміні вхідного сигналу на величину  $\varphi_3 = 0.2$

Порівнюючи перехідні характеристики на рис. 4.15 та рис. 4.17 бачимо, що інерційні властивості камери змішування на порядок кращі, чим сервопривода. Тому при синтезі системи управління необхідно ставити задачу стабілізації роботи сервоприводів каналів подачі теплого та холодного повітря в умовах високого рівня зовнішніх збурень.

#### 4.5.4 Моделювання динамічних властивостей об’єкта управління – камери змішування, при сумісній роботі з сервоприводами

Структурна схема математичної моделі об’єкта управління – камери змішування, при сумісній роботі з сервоприводами, що регулюють величину об’ємних потоків теплого та холодного повітря наводиться на рис. 4.18.

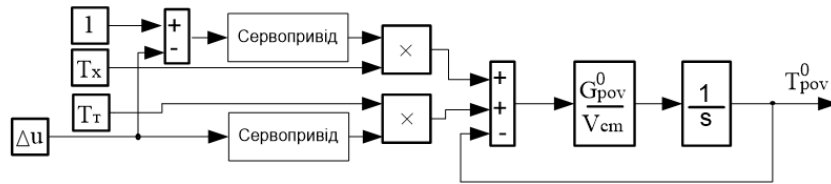


Рис. 4.18 - Структурна схема математичної моделі камери змішування при сумісній роботі з сервоприводами

Результати моделювання камери змішування, при сумісній роботі з сервоприводами, виконаного в математичному пакеті MatLab (додаток Simulink), продемонстровані на рис. 4.19. Моделювання показало, що об'єкт управління має властивість самовирівнювання та значну інерційність, яка визначається динамічними характеристиками сервопривода.

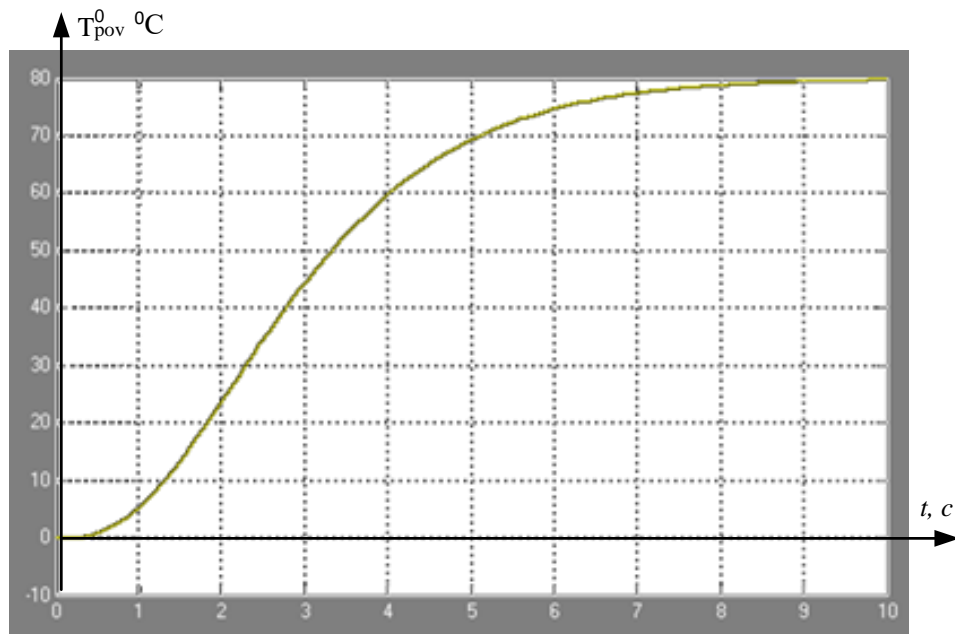


Рис. 4.19 - Перехідна характеристика камери змішування з сервоприводами при ступінчатій зміні сигналу керування на величину  $\Delta u = 1$ , що відповідає максимальній температурі

#### 4.5.5 Синтез системи стабілізації температури на вході в сушарку

Структурна схема замкнутої системи управління температурою на вході до камерної сушарки  $T_{pov}^0$  наведена на рис. 4.20.

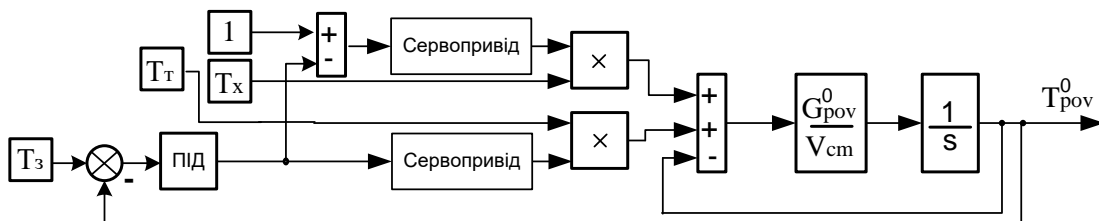


Рис. 4.20 - Структурна схема замкнутої системи управління температурою на вході в сушарку



Для оптимізації параметрів вибраного для регулювання ПІД-регулятора було прийнято рішення використати інструментальний пакет *Nonlinear Control Design Blockset* (NCD-Blockset), який надає графічний інтерфейс для знаходження таких параметрів динамічних об'єктів, що забезпечують бажану якість перехідних процесів [17,18]. Як засіб досягнення зазначеної мети приймається оптимізаційний підхід, базований на мінімізації функції штрафу порушення динамічних обмежень. За допомогою цього інструменту можна налаштовувати параметри нелінійної *Simulink*-моделі в будь-якій кількості. Особливу значення має те, що в процесі налаштування можуть враховуватися невизначеності параметричного типу математичної моделі, що дозволяє синтезувати робастні закони управління.

Завдання динамічних обмежень здійснюється у візуальному режимі. На базі цих обмежень *NCD-Blockset* автоматично генерує задачу оптимізації так, щоб точка екстремуму в просторі параметрів, що налаштовувалися відповідала виконанню всіх вимог, що пред'являються до якості перехідного процесу. Ця задача вирішується із залученням спеціалізованої процедури квадратичного програмування з пакету *Optimization Toolbox*. Хід оптимізації контролюється на екрані за допомогою відображення графіка контрольованого процесу а його результат фіксується у робочому просторі.

Вихідні дані для виконання синтезу налаштувань ПІД-регулятора з математичним описом  $R(s) = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d s$ :

- перерегулювання  $\sigma \leq 5 \%$ ;
- час перехідного процесу  $t_p \leq 2 \text{ c}$ .

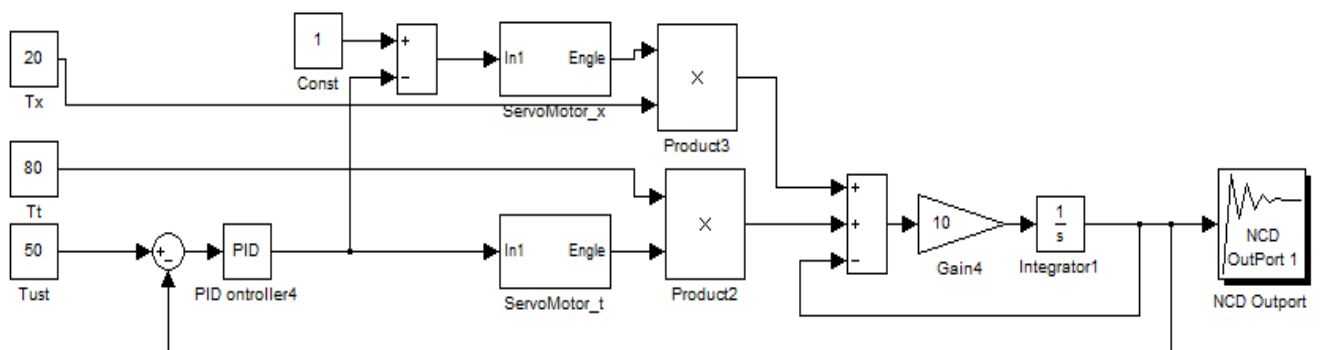


Рис. 4.21 - Структурна схема моделі замкнутої системи управління температурою на вході в сушарку в середовищі Simulink для оптимізації налаштувань

Побудуємо *Simulink*-модель об'єкта управління відповідно до рис. 4.20 та з урахуванням підключення до виходу блока *NCD Output* як це показано на рис. 4.21.

Відповідно до вихідних даних щодо якості перехідного процесу встановлюємо коридор, в межах якого повинен знаходитись вхідний сигнал блока *NCD Output* після оптимізації та запускаємо процес пошуку оптимальних налаштувань. Форма коридора та результати роботи інструментального пакета представлені на рис. 4.22.

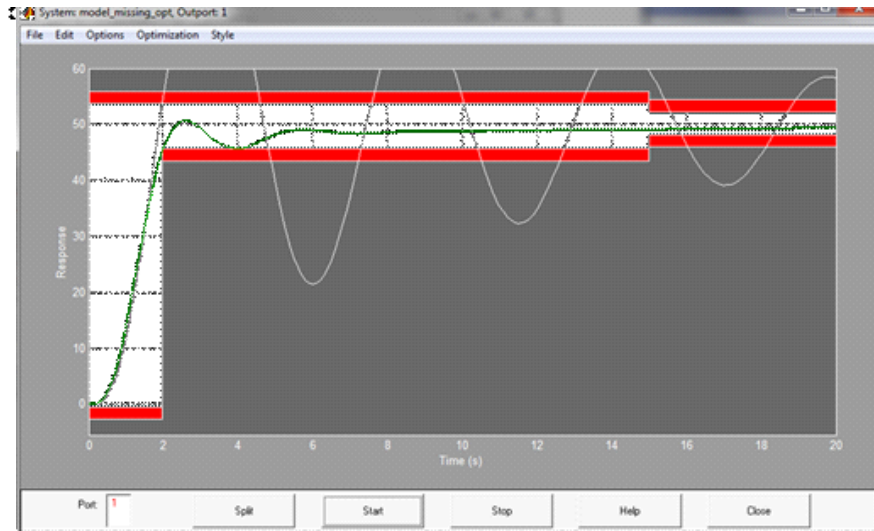


Рис. 4.22 - Форма заданого коридора та результати оптимізації налаштувань

Можна констатувати, що оптимізація налаштувань виконана успішно (на рис. 4.22 крива, що знаходиться в межах коридора) і показники якості перехідного процесу не перевищують заданих значень (перехідна характеристика системи управління з фактичними показниками якості показана на рис. 4.23). Оптимальні для цього процесу параметри налаштувань ПІД-регулятора:  $K_p = 0,072$ ;  $K_i = 0,007$ ;  $K_d = 0,058$ .

#### 4.5.6 Дослідження роботи системи стабілізації температури на вході в сушарку при дії зовнішніх збурень

В нормальних умовах процес сушіння матеріалу в камерній сушарці проходить в умовах наявності зовнішніх збурень двох видів:

- високочастотні збурення температури теплого повітря, який поступає в камеру змішування від джерела нагрівання (пічні гази або теплообмінник);
- низькочастотні збурення температури холодного повітря викликані добовими змінами температури атмосфери.

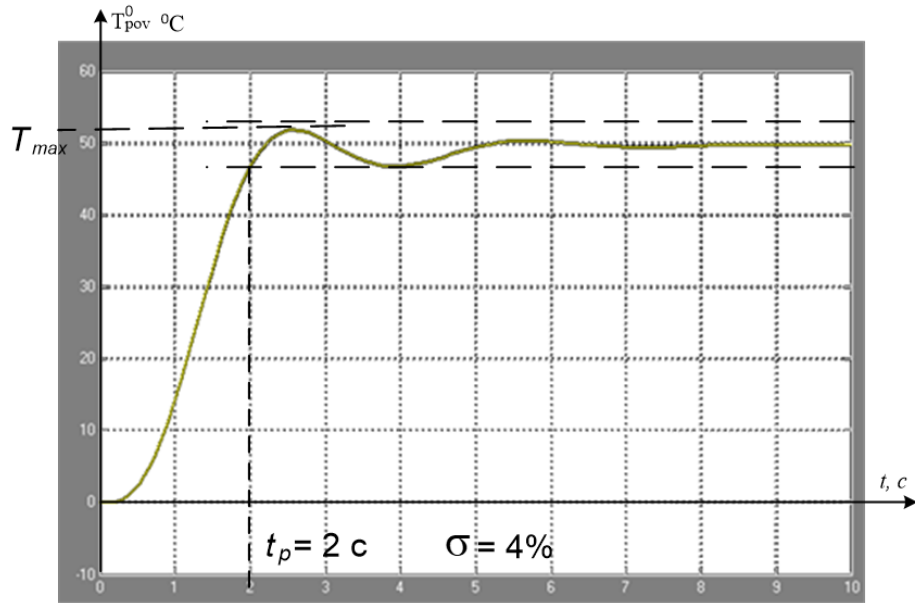


Рис. 4.23 - Оптимальний перехідний процес системи управління

Для імітації таких збурень та перевірки якості роботи системи управління в відповідних умовах була складена *Simulink*-модель системи (див. рис. 4.24), в якій до температури теплого повітря  $T_T$  додається височастотний випадковий сигнал з амплітудою  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , до температури теплого повітря  $T_X$  додається синусоїдальний сигнал низької частоти з амплітудою  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  (середньодобова зміна).

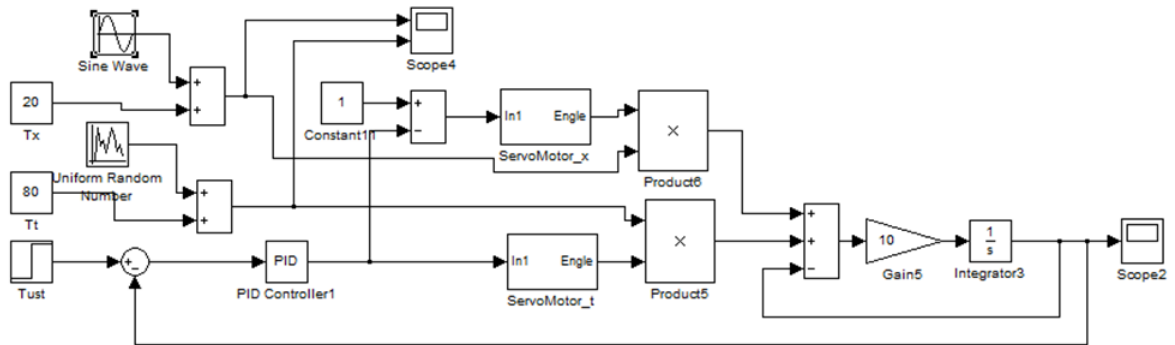


Рис. 4.24 - Структурна схема моделі замкнутої системи управління температурою на вході в сушарку в середовищі *Simulink* в умовах дії зовнішніх збурень

Форма вхідних збурень, що поступають в систему та результати роботи системи представлені на рис. 4.25.

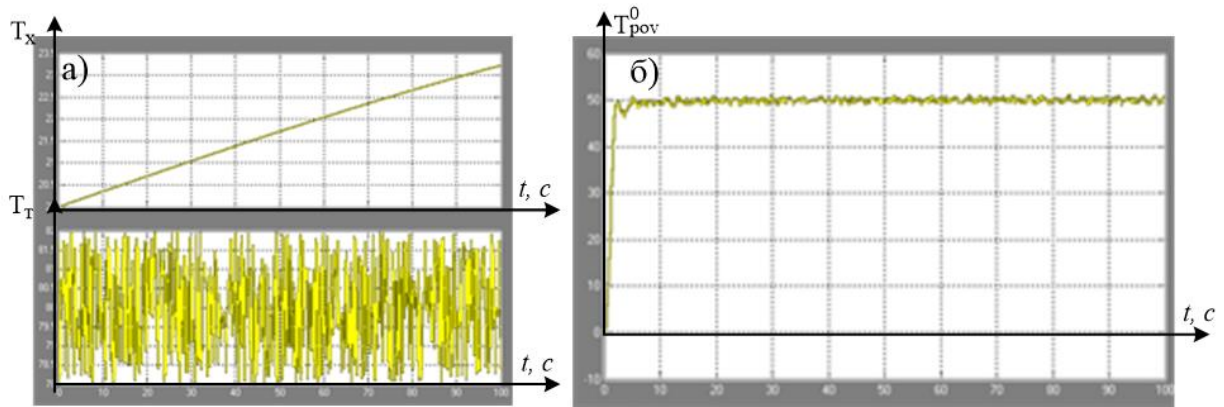


Рис. 4.25 - Вхідні збурення а) та перехідний процес системи управління б)

Імітаційне моделювання показує, що система управління температурою на вході в сушарку має задовільні фільтруючі властивості.

#### 4.6 Розроблення алгоритму роботи системи управління процесом сушіння матеріалу в камерній сушці періодичної дії

Узагальнений алгоритм роботи системи управління процесом сушіння матеріалу в камерній сушці періодичної дії представлений на рис. 4.26.

Черговий цикл сушіння партії цегли-сирцю починається з визначення вихідних даних для роботи системи, а саме: кількості завантажених в садкові цеглин  $N_c$  та початкової вологості матеріалу для висушування  $u_{mat0}$ , яку визначають одноразово за допомогою лабораторного контролю. Одночасно можуть бути зафіксовані дані стану атмосферного повітря: тиск та вологість, або беруться усереднені за рік.

Використовуючи математичну модель статички (формули (4-41а – 4-41в)) розраховуємо оптимальне з точки зору конкретних умов значення температури теплоносія на вході в камерну сушарку  $T_{rov}^0$ , що забезпечить регламентну норму різниці температур в камері та на поверхні матеріалу, для недопускання перегріву та появи браку.

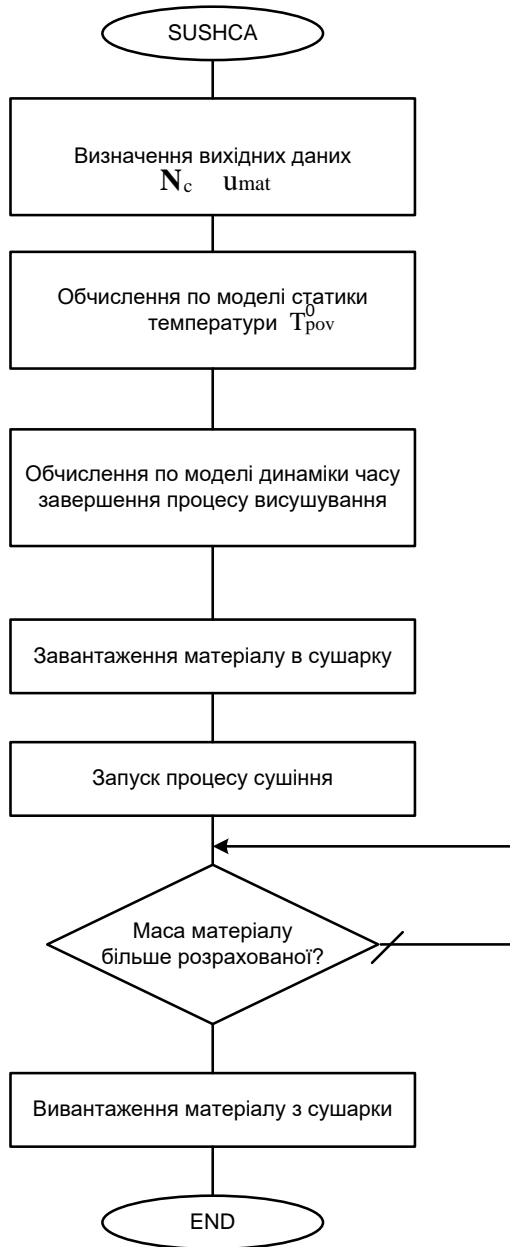


Рис. 4.26 - Алгоритм роботи системи управління процесом сушіння матеріалу в камерній сушці періодичної дії

На наступному етапі необхідно розрахувати орієнтовний час процесу сушіння, для чого використовується математична модель динаміки (4-33а) – (4-33е), яка дозволяє визначити час активної фази сушіння та знайти масу випареної вологи, на яку зменшиться маса матеріалу для сушіння в садкові  $M_{ww}$ . Контролюючи масу садка з матеріалом як різницю  $M_{fakt} = M_{mat0} - M_{ww}$ , не складно встановити час завершення процесу сушіння.

Після завершення розрахунків виконується завантаження садка в сушарку і запуск процесу сушіння. В процесі сушіння матеріалу виконується безперервний контроль залишкової маси матеріалу  $M_{fakt}$ . Якщо маса досягає розрахункового значення, процес сушіння закінчується і висушений матеріал вивантажується з сушарки.

## ВИСНОВОК

1. Технічний процес сушки цегли-сирцю вимагає значних витрат енергії. Без автоматичного керування та регулювання параметрів неможливо забезпечити ефективне керування процесом сушки. Запропонований підхід до побудови нечіткого регулятора керування технологічним процесом сушіння керамічних матеріалів має вирішити задачу стабілізації якості виготовленої продукції та підвищити продуктивність технологічного обладнання.

2. Автоматична система керування процесом сушки сирцю цегли забезпечує досить безпечний та ефективний режим контролювання та регулювання основних технологічних параметрів процесу. Впровадження системи автоматичного управління забезпечує максимально економне споживання енергії.

3. Вибрані технічні засоби автоматизації дозволяють дистанційно управляти процесами і механізмами управління в автоматичному режимі і надійно блокувати їх роботу при виникненні надзвичайної ситуації на виробництві. Контролер є основною ланкою обробки інформації та центральним органом управління комплексом. Виконує команди програми та організовує обробку інформації.

4. Подальше вдосконалення управління енергоефективністю система реалізується за допомогою таких пророблених кроків:

- система автоматизації базується на об'єднанні локальних підсистем управління в розподілені системи;
- вибрано надійний мікроконтролер ОВЕН ПЛК200, який буде працювати безперебійно, навіть в аварійних ситуаціях;
- розроблено простий та надійний алгоритм роботи всього технологічного процесу виготовлення та сушки цегли;

**та найголовніші етапи, на яких було сконцентровано увагу в цій роботі:**

- знайдено чинники, за допомогою яких втрачається якість та енергія в процесі виготовлення цегли;
- було оптимізовано і розраховано оптимальні умови від різних чинників в сушильній камері;
- скорочено час сушки цегли та зменшено вирогідність бракованої цегли, із-за більш правильного процесу сушіння керамічної цегли в якому підтримується постійно оптимальна температура і при оптимальній розрахованій вазі цегли матеріал вивантажується з сушарки, що не дає цеглі перестояти і втратити свої найкращі властивості;

5. Перевагами даної роботи є підбір мінімальної кількості параметрів контролю та регулювання, підбір нових, сучасних, економічних, взаємозамінних, технічних засобів

автоматизації, які прості в налаштуванні та експлуатації. Основну увагу в роботі було сконцентровано на «Розрахункову частину», в якій було покращено роботу сушильної камери, що дуже сильно покращило енергоефективність та якість продукції.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Автоматизація технологічного процесу сушіння керамічної цегли, 2007 [Електронний ресурс]: – Режим доступу: <https://www.dissercat.com/content/avtomatizatsiya-technologicheskogo-protsesta-sushky> – Назва з екрану
2. Позін М.Є., Зінюк Р.Ю. Фізико-хімічні засади неорганічної технології. Навчальний. Посібник для вузів. - Л.: Хімія, 1985. - 384 с.
3. Чумак Л.І, Лавренюк І.В., Платонова Т.О. Математичне моделювання процесу сушки керамічної цегли в тунельних сушилах Вісник ПДАБА №10, 2017 Дн-ськ с. 26-30
4. Чумак Л.І, Шпірько М.В., Платонова Т.О., Сенька Т.М. Математичне моделювання процесу обпалювання керамічної цегли, Вісник ПДАБА, №10, 2017 Дн-ськ с.30-35
5. Прокопенко М.М. Математична модель технологічного процесу термовлажностной обробки керамічної цегли// «Вісник БДТУ ім. В.Г. Шухова» Науково-теоретичний журнал. Ч. 111, 6/2003. - С.194-198
6. Ковального Н.Н., Павловичева Т.В. До моделювання тепловлажностного стану цегли у його сушіння // Вісник Ульяновського державного технічного університету. №4. 2009. С. 33 – 39.
7. Алгоритмічне забезпечення інформаційно-керуючої системи динамічними режимами барабанної сушильної установки на багатьох станах функціонування, 2018 [Електронний ресурс]: – Режим доступу: <https://www.dissercat.com/content/adaptivnaya-sistema-upravleniya-sushilnymi-kamerami> – Назва з екрану
8. Чаудхарі Р.Р. Комплексна автоматизація технологічного процесу виробництва керамічної цегли // Автоматизація та управління в технічних системах. – 2018. – № 1
9. Ликов А.В. Теорія сушіння /О.В. Ликов. – М.: Енергія, 1968. - 472с.
10. Сушіння вологих матеріалів, 2018 [Електронний ресурс]: – Режим доступу: [https://studref.com/360802/ekologiya/sushka\\_vlazhnyh\\_materialov](https://studref.com/360802/ekologiya/sushka_vlazhnyh_materialov) – Назва з екрану
11. Співак О. Ю. Математичне моделювання процесу сушіння цегли / О. Ю. Співак, І. В. Фінік, П. С. Коба // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2017. – №2. – с. 29–34
12. Математичне моделювання та застосування ЕОМ у хімічній технології: конспект лекцій / укладач Худолей Г.М. – Суми: Сумський державний університет, 2013. – 183 с.
13. Г.М. Худолей, Н.О. Медведкова, О. Єврах. Блок моделювання стану вологого повітря в середовищі математичного пакете MATLAB. Збірник наукових праць VI Міжнародної науково-практичної конференції «Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво» (Шостка, 23-25 листопада 2022 року), с. 209-212



14. Д'яконов В.П., Абраменкова І.В. MathCad 7.0 в математиці, фізиці та в Internet. – М.: «Нолідж», 1998. – 352 с.
15. Худолей Г.М. Теорія автоматичного управління: конспект лекцій: у 2 частинах. Ч. 2. Синтез лінійних систем автоматичного управління / укладач Г.М.Худолей. – Суми: Сумський державний університет, 2012. – 87 с.
16. Давлетшина В. Н., Шамаєв Е. І. Про комутуючі диференційні операторах рангу два, 2014 [Електронний ресурс]: – Режим доступу: <https://www.iac.nsk.su> – Назва з екрану
17. Лазарєв Ю. Ф. Моделювання на ЕОМ. Навч. посібник. – К.: Корнійчук, 2007. - 290 с.
18. Веремей Є.І, Погожев С.В. Електронний посібник "Nonlinear Control Design Blockset", 2018 [Електронний ресурс]: – Режим доступу: <http://matlab.exponenta.com/nonlinecondes/book1/index.php> – Назва з екрану
19. Єврах О. О. Кваліфікацій робота бакалавра «Система управління процесом виготовлення цегли», 2021
20. Цегельний завод. Автоматизоване виробництво цегли, 2019 [Електронний ресурс]: – Режим доступу до ресурсу: <https://chemtech-bayern.com.ua> – Назва з екрану
21. Автоматизація технічних процесів: ДСТУ 21.404 – 85
22. Виробництво будівельної кераміки [Електронний ресурс] // Всеукраїнська спілка виробників будматеріалів. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <http://avbmv.com.ua> – Назва з екрану
23. Emrullahoglu Abi C.B. Effect of borogypsum on brick properties. Construction and Building Materials. 2018, v. 59, pp. 195–203
24. Cusidó J.A., Cremades L.V., Soriano C., Devant M. Incorporation of paper sludge in clay brick formulation: Ten years of industrial experience. Applied Clay Science. 2017, v. 108, pp. 191–198.
25. Chiara Coletti, Lara Maritan, Giuseppe Cultrone. Recycling trachyte waste from the quarry to the brick industry: Effects on physical and mechanical properties, and durability of new bricks. Construction and Building Materials. 2018, v. 166, pp. 792-807
26. Helen Zhang, Gang Shen, David Jin, Advanced Research on Information Science, Automation and Material System, 2017
27. Avtandil Bardavelidze, Khatuna Bardavelidze ,Irakli Basheleishvili, Computer Modeling of Automation Systems, 2019
28. Jeevargi, Chetankumar Design and simulation of front end power converter for a microgrid with fuel cells and solar power sources [Text] / Chetankumar Jeevargi, Anuj Lodhi, Allu Sateeshkumar, D. Elangovan , G. Arunkumar // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 263, 2017, pp. 1 - 7. doi:10.1088/1757- 899X/263/5/052003

## ДОДАТОК А

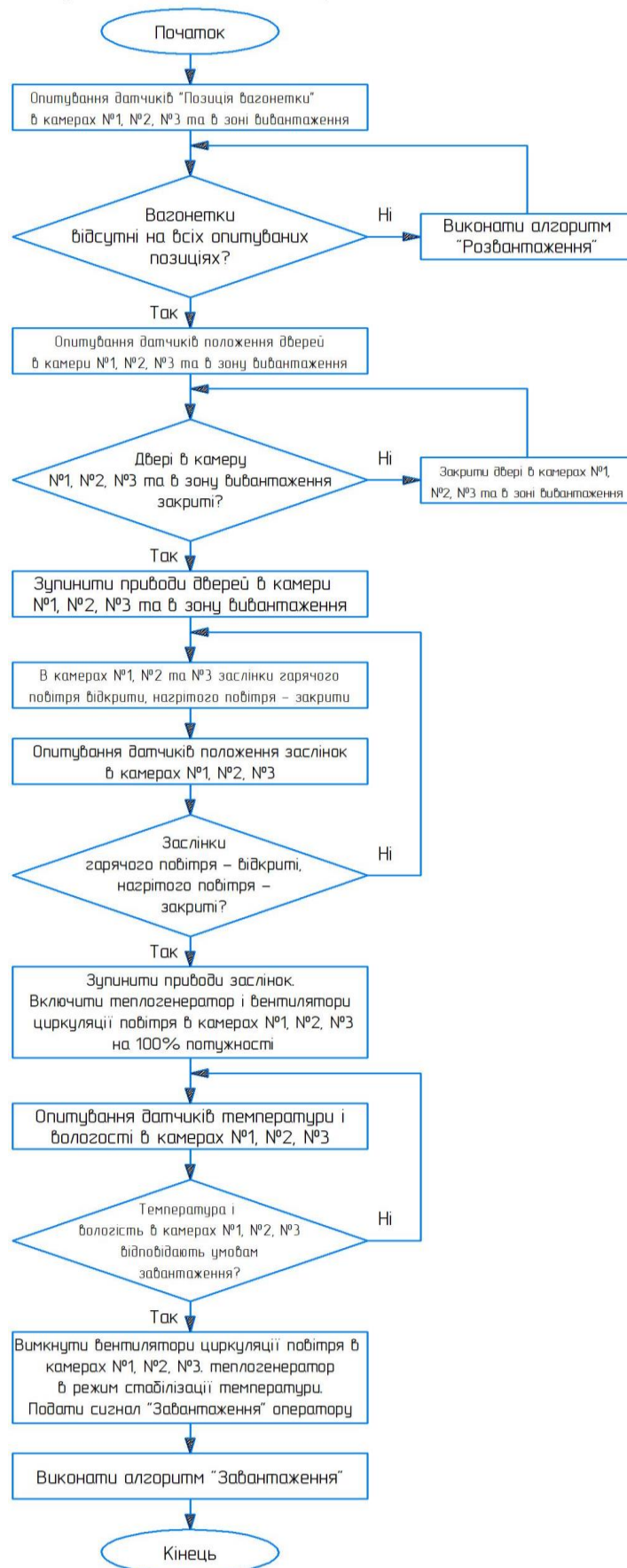


Рис. А.1 – Алгоритм підготовки до праці

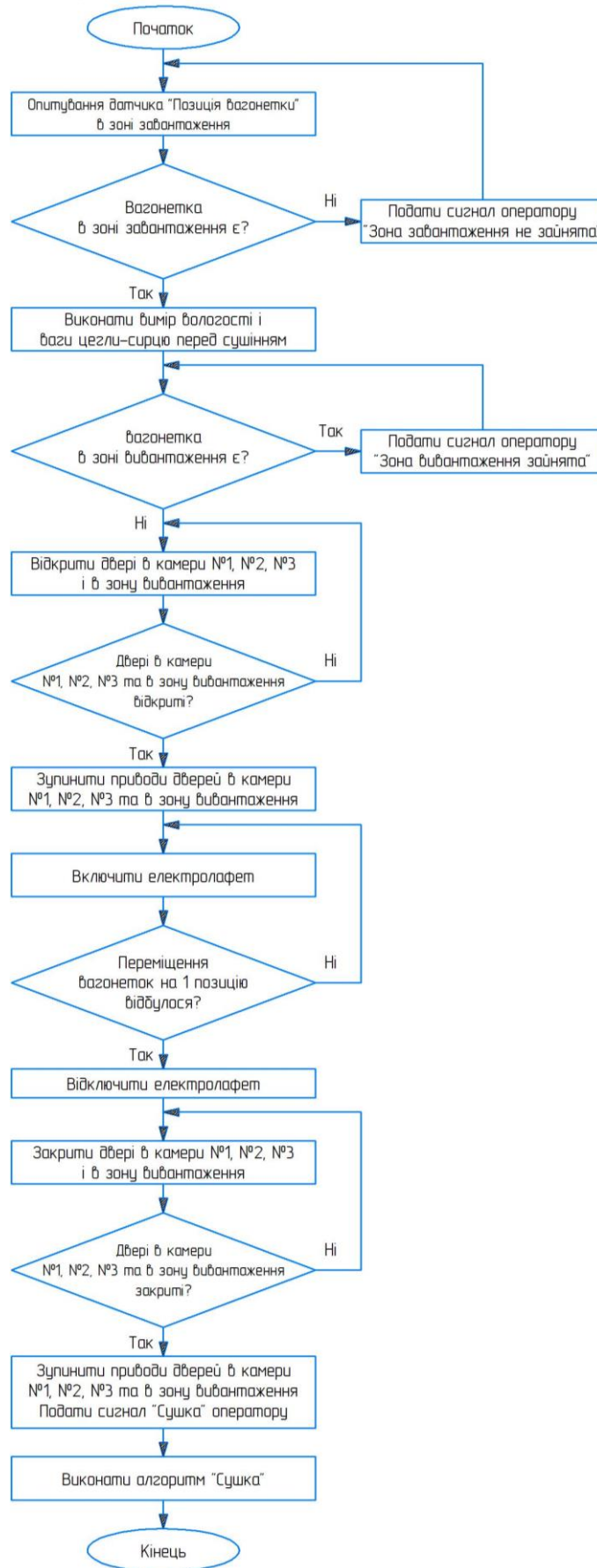


Рис. А.2 – Алгоритм «Завантаження»

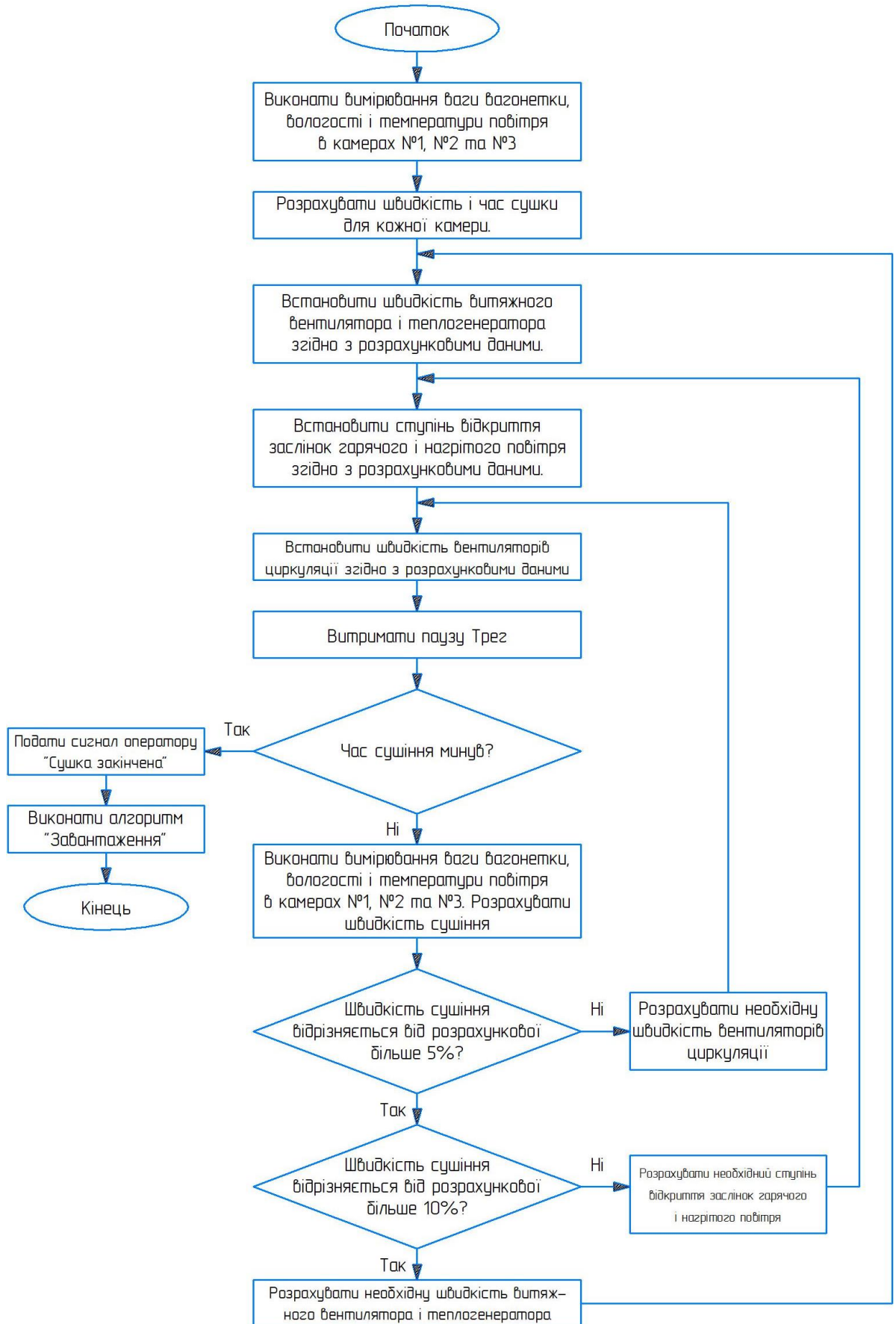


Рис. А.3 – Алгоритм «Сушка»

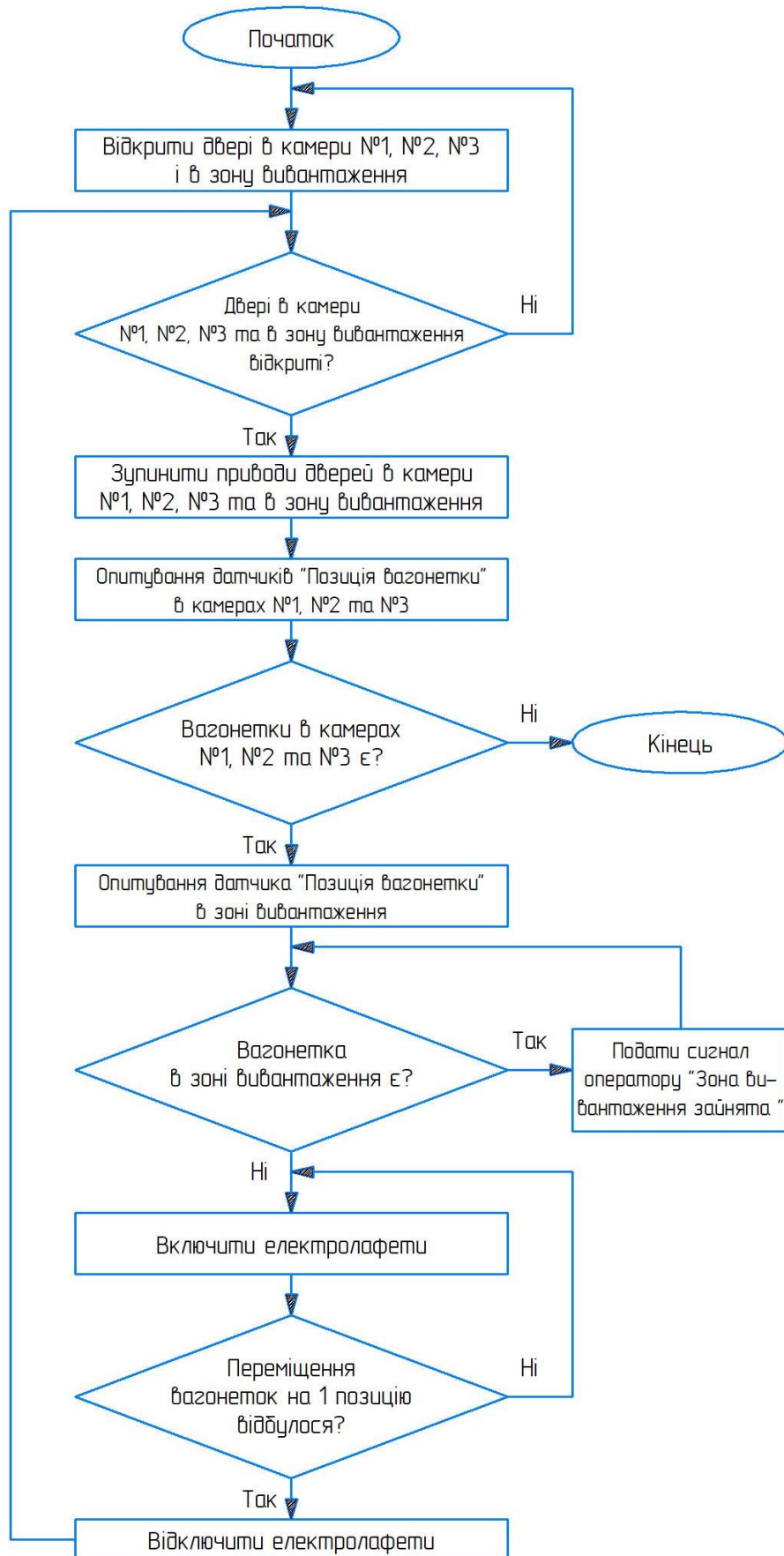


Рис. А.4 – Алгоритм «Розвантаження»

## ДОДАТОК Б

=== Блок обчислення температури "мокрого термометра" ===

$$P_{npov}(T_{pov}) := e^{\frac{16.57 \cdot T_{pov} - 115.72}{233.77 + 0.977 \cdot T_{pov}}} \cdot 10^3 \quad u_{pov}(T_{pov}, P_{atm}, F_i) := 0.6221 \cdot \frac{\frac{F_i}{100} \cdot P_{npov}(T_{pov})}{P_{atm} - \frac{F_i}{100} \cdot P_{npov}(T_{pov})}$$

$$P_{nmt}(T_{mt}) := e^{\frac{16.57 \cdot T_{mt} - 115.72}{233.77 + 0.977 \cdot T_{mt}}} \cdot 10^3 \quad r_{mt}(T_{mt}) := 2501 - 2.36 \cdot T_{mt}$$

$$u_{mt}(P_{atm}, T_{mt}) := 0.6221 \cdot \frac{P_{nmt}(T_{mt})}{P_{atm} - P_{nmt}(T_{mt})}$$

$$F_{MT}(T_m, T_{pov}, F_i, P_{atm}) := T_{pov} - \frac{r_{mt}(T_m) \cdot (u_{mt}(P_{atm}, T_m) - u_{pov}(T_{pov}, P_{atm}, F_i))}{1.006 + 1.96 \cdot u_{pov}(T_{pov}, P_{atm}, F_i)} - T_m$$

=== реалізація функції розв'язку рівняння методом діхотомії ===

```
Calc_MT2(Tp, a, b, eps, F) :=
  xn ← a
  xk ← b
  while xk - xn > eps
    x ← (xk + xn) / 2
    xk ← x if F(xn, Tp, Fi_pov, Patm) · F(x, Tp, Fi_pov, Patm) < 0
    xn ← x otherwise
  (xk + xn) / 2
```

Рис. Б.1 – Функція для розрахунку температури «мокрого термометра»:  $T_{pov}$  – температура повітря;  $F_i$  – відносна вологість;  $P_{atm}$  – атмосферний тиск

```

=== реалізація функції розв'язку системи диференційних рівнянь моделі
      модифікованим методом Ейлера ====
Euler(F1, F2, F3, F4, y0, x0, z0, w0, a, b, N) :=
:=
  t0 ← a
  y0 ← y0
  x0 ← x0
  z0 ← z0
  w0 ← w0
  h ←  $\frac{(b - a)}{N}$ 
  for i ∈ 0.. N - 1
    ti+1 ← ti + h
    mwi ←  $\frac{\text{alfa} \cdot (y_i - x_i)}{(2501 - 2.36 \cdot x_i)}$ 
    yi+1 ← yi +  $\frac{h}{2} \cdot (F1(t_i, y_i, x_i, mw_i) + F1(t_{i+1}, y_i + h \cdot F1(t_i, y_i, x_i, mw_i), x_i + h \cdot F1(t_i, y_i, x_i, mw_i), mw_i))$ 
    Tmti ← Calc_MT2(yi+1, 0, 100, 0.1, FMT)
    fr2i ← F2(ti, yi, xi, Tmti, zi)
    xi+1 ← xi +  $\frac{h}{2} \cdot (fr2_i + F2(t_{i+1}, y_i + h \cdot fr2_i, x_i + h \cdot fr2_i, Tmt_i, z_i + h \cdot fr2_i))$ 
    fr3i ← F3(ti, yi, xi, Tmti, zi)
    zi+1 ← zi +  $\frac{h}{2} \cdot (fr3_i + F3(t_{i+1}, y_i + h \cdot fr3_i, x_i + h \cdot fr3_i, Tmt_i, z_i + h \cdot fr3_i))$ 
    fr4i ← F4(ti, yi, xi, Tmti, zi, wi, mwi)
    wi+1 ← wi +  $\frac{h}{2} \cdot (fr4_i + F4(t_{i+1}, y_i + h \cdot fr4_i, x_i + h \cdot fr4_i, Tmt_i, z_i + h \cdot fr4_i, w_i + h \cdot fr4_i, mw_i))$ 
    mwi+1 ← mwi
  augment(t, y, x, z, w, mw)

=== функції правих частин системи диференційних рівнянь моделі ===
F1(t, Tпов, Tмат, mw) := Gпов0  $\frac{Tпов0}{Vck} - \frac{(1 + \text{beta}) \cdot (Gпов0 \cdot \text{ro\_пов} + mw) \cdot Tпов}{Vck \cdot \text{ro\_пов}} - \frac{\text{alfa} \cdot k_f \cdot Nc \cdot f\_mat \cdot (Tпов - Tмат)}{Vck \cdot \text{ro\_пов} \cdot \text{cp\_пов}}$ 

F2(t, Tпов, Tмат, Tмт, umat) :=  $\begin{cases} \text{alfa} \cdot f\_mat \cdot \frac{(Tпов - Tмат)}{\text{cp\_mat} \cdot \text{mc}_c \cdot (1 + \text{umat})} & \text{if } (Tмат < Tмт) \vee (\text{umat} < 0.05) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$ 

F3(t, Tпов, Tмат, Tмт, umat) :=  $\begin{cases} 0 & \text{if } (Tмат < Tмт) \vee (\text{umat} < 0.05) \\ -\text{alfa} \cdot \frac{(Tпов - Tмат)}{(2501 - 2.36 \cdot Tмат) \cdot Nc \cdot \text{mc}_c} & \text{otherwise} \end{cases}$ 

F4(t, Tпов, Tмат, Tмт, umat, upов, mw) :=  $\begin{cases} Gпов0 \frac{upов0}{Vck} - \frac{Gпов0 \cdot upов}{Vck} & \text{if } (Tмат < Tмт) \vee (\text{umat} < 0.05) \\ Gпов0 \frac{upов0}{Vck} - \frac{(Gпов0 \cdot \text{ro\_пов} + mw) \cdot upов}{Vck \cdot \text{ro\_пов}} + \frac{mw}{(Vck \cdot \text{ro\_пов})} & \text{otherwise} \end{cases}$ 

=== чисельне рішення системи диференційних рівнянь моделі ===
a := 0    b := 20    N := 10000

Z := Euler(F1, F2, F3, F4, Tпов0, Tмат0, umat0, upов0, a, b, N)

```

Рис. Б.2 – Програма розв'язання математичної моделі технологічного процесу висушування матеріалу в камерній сушарці

```

=== Блок констант моделі ====
Fi_pov := 45   Patm := 99310   Vck := 8   ro_pov := 1.2   f_mat := 0.106   alfa := 54000
beta := 0.08   kf := 0.9   cp_pov := 1005   mc_c := 3.5   cp_mat := 750   Nc := 2000
=== система рівнянь для визначення температури "мокрого термометра" ===

Pnpov(Tpov) := e(16.57·Tpov-115.72)/(233.77+0.977·Tpov) · 103
Pnmt(Tmt) := e(16.57·Tmt-115.72)/(233.77+0.977·Tmt) · 103
umt(Patm, Tmt) := 0.6221 · (Pnmt(Tmt) / (Patm - Pnmt(Tmt)))
rmt(Tmt) := 2501 - 2.36·Tmt

upov(Tpov, Patm, Fi) := 0.6221 · (Fi / 100) / (Patm - (Fi / 100) · Pnpov(Tpov))
FMT(Tm, Tpov, Fi, Patm) := Tpov - (rmt(Tm) · (umt(Patm, Tm) - upov(Tpov, Patm, Fi)) / (1.006 + 1.96·upov(Tpov, Patm, Fi))) - Tm
=== реалізація функції розв'язку рівняння методом діхотомії ===

Calc_MT2(T, a, b, eps, F) :=
  xn ← a
  xk ← b
  while xk - xn > eps
    x ← (xk + xn) / 2
    xk ← x if F(xn, T, Fi_pov, Patm) · F(x, T, Fi_pov, Patm) < 0
    xn ← x otherwise
  (xk + xn) / 2

mw(Tp) := (alfa · (Tp - Calc_MT2(Tp, 10, 90, 0.1, FMT))) / (2501 - 2.36 · Calc_MT2(Tp, 10, 90, 0.1, FMT))

Eqw1(T, Gpov0, Tpov0) :=
Gpov0 · (Tpov0 / Vck - (1 + beta) · (Gpov0 · ro_pov + mw(T)) · T / (Vck · ro_pov) - (alfa · kf · Nc · f_mat · (T - Calc_MT2(T, 10, 90, 0.1, FMT))) / (Vck · ro_pov · cp_pov))

Eqw4(T, upov, Gpov0, upov0) := Gpov0 · (upov0 / Vck - (Gpov0 · ro_pov + mw(T)) · upov / (Vck · ro_pov) + (mw(T) / (Vck · ro_pov)))

=== Блок вхідних даних ===
Gpov0 := 5400   Tpov0 := 55   Tmat0 := 20   umat0 := 0.25   upov0 := 0.02
=== реалізація функції розв'язку системи рівнянь моделі статички ===

Tp := 5   up := 0.01

Given
Eqw1(Tp, Gpov0, Tpov0) = 0
Eqw4(Tp, up, Gpov0, upov0) = 0
Z := Find(Tp, up)

```

Рис. Б.3 – Програма розв'язання математичної моделі статички



Тр <sub>пов0</sub> = 50			Гр <sub>пов0</sub> = 5400		
Гр <sub>пов0</sub>	Тр <sub>пов</sub>	уп <sub>пов</sub>	Тр <sub>пов0</sub>	Тр <sub>пов</sub>	уп <sub>пов</sub>
2000	18.5	0.076	30	17.9	0.041
3000	24.4	0.065	35	21.3	0.043
4000	28.1	0.057	40	24.7	0.046
5000	30.8	0.052	45	28.2	0.048
6000	32.7	0.048	50	31.6	0.05
7000	34.3	0.045	55	35.1	0.052
8000	35.5	0.042	60	38.6	0.054
9000	36.5	0.04	70	45.5	0.059
10000	37.3	0.038	80	52.5	0.063
11000	38	0.037	90	59.4	0.066
12000	38.02	0.0371	100	66.5	0.07

Рис. Б.4 – Результаты чисельного эксперимента



